

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт

«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

_____ Г.Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

Компенсация емкостных токов замыкания на землю в сети 10 кВ ПС «КСК»
ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго»
тема

Руководитель	_____	<u>доцент, к.т.н.</u>	<u>Е. В. Платонова</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>К.В. Шнякин</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>И. А. Кычакова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Абакан 2021

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Компенсация емкостных токов замыкания на землю в сети 10 кВ ПС «КСК» ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго» содержит 55 страниц текстового документа, 25 использованных источников, 13 рисунков, 6 таблиц, 3 листа графического материала, приложение на 3 страницах.

РЕЛЕЙНАЯ ЗАЩИТА, ОДНОФАЗНОЕ ЗАМЫКАНИЕ НА ЗЕМЛЮ, ИЗОЛИРОВАННАЯ НЕЙТРАЛЬ, ЕМКОСТНОЙ ТОК, ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ.

Объект исследования – емкостные токи ПС № 26 110 кВ «КСК» ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго».

Целью выпускной квалификационной работы является разработка предложений по компенсации токов ОЗЗ в сети 10 кВ ПС «КСК» ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго».

Задачи выпускной квалификационной работы:

- Анализ оборудования для компенсации ОЗЗ в сетях 10 кВ
- Определение емкостных токов ОЗЗ для ПС «КСК» ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго»
- Выбор ДГР
- Выбор высокоомного резистора

В процессе работы был произведён расчёт емкостных токов на ПС «КСК» в сети 10 кВ, проанализированы полученные значения и на их основании выбраны устройства компенсации емкостных токов.

Результаты работы могут послужить основой для выбора компенсирующих устройств ПС, а также позволит компаниям электросетевого комплекса обратить внимание на наиболее перспективные режимы – резистивно-заземленные, которые позволяют нивелировать недостатки других типов заземления.

THE ABSTRACT

The final qualifying work on the topic «Compensation of capacitive earth fault currents in the 10 kV network of the PS «KSK» of PJSC «Rosseti Siberia» - «Khakasenergo» contains 55 pages of a text document, 25 sources used, 13 figures, 6 tables, 3 sheets of graphic material, an appendix on 3 page.

RELAY PROTECTION, SINGLE-PHASE EARTH FAULT, ISOLATED NEUTRAL, CAPACITIVE CURRENT, NEUTRAL GROUNDING.

The object of the study is substation No. 26 110 kV «KSK» of PJSC «Rosseti Siberia» - «Khakasenergo».

The purpose of the final qualification work is to compensate for the em-bone earth fault currents in the 10 kV network of the PS KSK of PJSC «ROSSETI Siberia» – «Khakasenergo».

Tasks of the final qualification work:

- Determine the effect of the capacitive current on the power line.
- Study compensatory measures of protection.
- To analyze the application of various methods of neutral grounding in different countries of the world.
- Calculate the capacitive currents of the PS 110 kV KSK Chernogorsk.
- Select the compensating equipment and compare it.

In the process of work, the capacitive currents were calculated on the PS «KSK» in the 10 kV network, the obtained values were analyzed and on their basis, capacitive current compensation devices were selected.

The results of the work can serve as a basis for choosing compensating PS devices, and will also allow companies of the electric grid complex to pay attention to the most promising modes – resistive-grounded, which allow leveling the disadvantages of other types of grounding.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1 Теоретическая часть	7
1.1 Понятие емкостного тока	7
1.2 Компенсационные меры защиты	10
1.3 Дугогасящий реактор	11
1.3.1 Принцип действия дугогасящего реактора	12
1.3.2 Конструкция ДГР	14
1.3.3 Недостаток ДГР	15
1.4 Резистор	18
1.4.1 Высокоомное резистивное заземление нейтрали сети 6 и 10 кВ	19
1.4.2 Низкоомное резистивное заземление нейтрали сети 6 и 10 кВ	23
2 Аналитическая часть	24
2.1 Анализ компенсации емкостных токов	24
2.2 Применение различных способов заземления нейтрали различных стран мира	25
2.3 Сравнение оборудования, предназначенное для защиты от однофазных замыканий на землю в электросетях	28
2.4 Обзор производителей	31
2.5 Параметры. Характеристика оборудования	34
3 Практическая часть	39
3.1 Характеристика ПС 110 кВ «КСК» ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго»	39
3.2 Расчёт ёмкостных токов	42
3.3 Расчёт мощности ДГР	44
3.4 Расчёт сопротивления и выбор резистора	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	48
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	50
ПРИЛОЖЕНИЕ	53

ВВЕДЕНИЕ

В электротехнике существует такое понятие как емкостный ток, более известный в качестве емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях. Однофазное замыкание на землю (далее ОЗЗ) является наиболее распространенным видом повреждения, на него приходится порядка 70-90 % всех повреждений в электроэнергетических системах. Протекание физических процессов, вызванных этим повреждением, в значительной мере зависит от режима работы нейтрали данной сети. Для того чтобы избежать серьезных негативных последствий, необходимо своевременно и правильно выполнять расчет емкостного тока сети и компенсации его.

В России, согласно п.1.2.16 последней редакции ПУЭ, введенных в действие с 1 января 2003 г., «...работа электрических сетей напряжением 2-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор».[1] Таким образом, сейчас в сетях 6-35 кВ в России формально разрешены к применению все принятые в мировой практике способы заземления нейтрали, кроме глухого заземления.

В сетях, где используется заземленная нейтраль, замыкание фазы на землю приводит к короткому замыканию. В данном случае ток КЗ протекает через замкнутую цепь, образованную заземлением нейтрали первичного оборудования. Такое повреждение приводит к значительному скачку тока и, как правило, незамедлительно отключается действием РЗ, путем отключения поврежденного участка.

Электрические сети классов напряжения 6–35 кВ работают в режиме с изолированной нейтралью или с нейтралью, заземленной через большое добавочное сопротивление. В этом случае замыкание фазы на землю не приводит к образованию замкнутого контура и возникновению КЗ, а ОЗЗ замыкается через емкости неповрежденных фаз. [2]

Нормативные документы (ПТЭЭП) [3] допускают работу линии, с изолированной нейтралью, при ОЗЗ – до шести часов, но при этом необходимо немедленно приступить к отысканию места замыкания и его устранению, так как в этом режиме есть большая опасность попадания людей под высокое напряжение. Также, возможно повреждение электрооборудования из-за повышения фазного напряжения до уровня линейного.

Каждый изолированный проводник обладает некоторой емкостью относительно земли. При нарушении изоляции, возникает емкостной ток, стекающий в землю и дуга.

Это приводит:

- К возникновению шагового напряжения в месте замыкания.
- К генерации помех.
- К возникновению электрической дуги.
- К перенапряжениям, многоточечным пробоям изоляции нескольких фаз и коротким межфазным замыканиям.
- К возникновению феррорезонансных процессов в трансформаторах и их повреждению.

Целью выпускной квалификационной работы является разработка предложений по компенсации токов ОЗЗ в сети 10 кВ ПС «КСК» ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго».

Поставлены следующие задачи:

- Анализ оборудования для компенсации ОЗЗ в сетях 10 кВ
- Определение емкостных токов ОЗЗ для ПС «КСК» ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго»
- Выбор ДГР
- Выбор высокоомного резистора

Объектом исследования являются емкостные токи ПС № 26 110 кВ «КСК» г. Черногорск.

1 Теоретическая часть

1.1 Понятие емкостного тока

Емкостный ток возникает как правило на линиях с большой протяженностью. В этом случае земля и проводники работают аналогично обкладкам конденсатора, способствуя появлению определенной емкости (рисунок1). Поскольку напряжение в ЛЭП обладает переменными характеристиками, это может послужить толчком к его появлению.

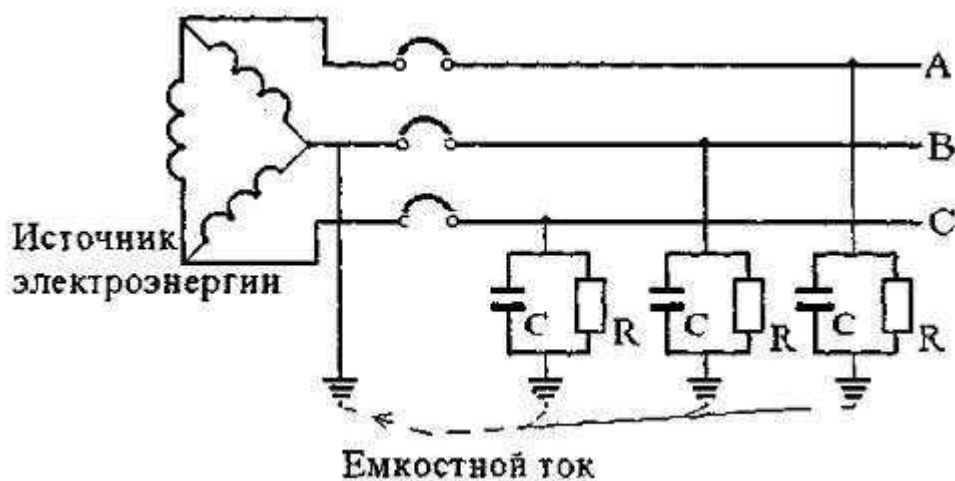


Рисунок 1 – Схема протекания тока замыкания на землю

При нормальном режиме фазное напряжение в $\sqrt{3}$ меньше линейного. Соблюдается симметрия фазных напряжений. Это видно на векторной диаграмме нормального режима (рисунок 2). При ОЗЗ фазное напряжение неповреждённых фаз вырастает до линейного и появляется напряжение нулевой последовательности, треугольник линейных напряжений остаётся без изменений.

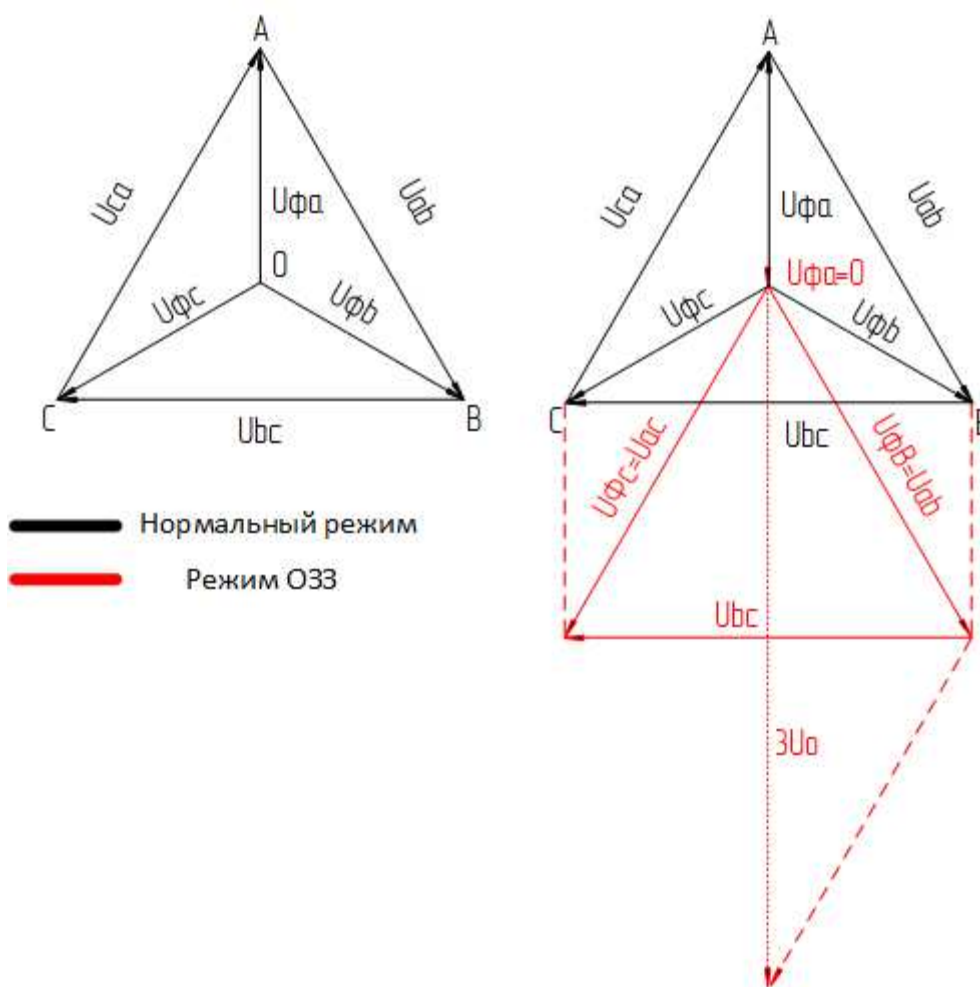


Рисунок 2 – Векторная диаграмма напряжений

. В случае отключения линии, находящейся в ненагруженном состоянии, величина емкостного тока может достигнуть нескольких десятков и даже сотен ампер. В процессе отключения, когда наступает момент перехода тока через нулевое значение, напряжение на расходящихся контактах будет отсутствовать. Однако, в следующий момент вполне возможно образование электрической дуги.

Если значение емкостного тока не превышает 30 ампер, это не приводит к каким-либо серьезным повреждениям оборудования в зоне опасных перенапряжений и замыканий на землю. Электрическая дуга, появляющаяся на месте повреждения, достаточно быстро гаснет с одновременным появлением устойчивого замыкания на землю.

Значение тока ОЗЗ невелико. Это позволяет эксплуатировать сеть, не отключая повреждения данного вида незамедлительно. Но в таком случае изоляция оборудования будет стареть намного быстрее, и это может привести к более опасному явлению – короткому замыканию, которое требует немедленного отключения поврежденного участка сети.

Несмотря на преимущества изолированной нейтрали, такой режим работы имеет ряд недостатков:

В зависимости от разветвленности сети емкостной ток может находиться в пределах от 0,1 до 500 ампер. Такая величина тока может представлять опасность для животных и людей, находящихся рядом с местом замыкания, по этой причине данные замыкания нужно выявлять и отключать, так же, как это делается и в сетях с глухозаземленной нейтралью.

В большинстве случаев при ОЗЗ возникает дуговое замыкание на землю, которое может носить прерывистый характер. В таком случае, в процессе дугового замыкания возникают перенапряжения, превышающие в 2-4 раза номинальное фазное напряжение. Изоляция в процессе замыкания может не выдержать такие перенапряжения, вследствие чего возможны возникновения пробоя изоляции в любой другой точке сети и тогда замыкание развивается в двойное короткое замыкание на землю.

В процессе развития и ликвидации ОЗЗ в трансформаторах напряжения возникает эффект феррорезонанса, что с высокой вероятностью приводит к их преждевременному выходу из строя.

Для предотвращения возникновения дуги необходимо снижать ёмкостные токи. Для того чтобы уменьшить ток замыкания на землю, в сетях, напряжением от 6 до 35 киловольт, осуществляется компенсация емкостного тока. Это позволяет снизить скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги. Кроме того, снижаются перенапряжения в случае повторных зажиганий дуги. Компенсация выполняется с применением дугогасящих заземляющих реакторов, имеющих плавную или ступенчатую регулировку индуктивности.

1.2 Компенсационные меры защиты

ОЗЗ представляют большую опасность для оборудования электрических сетей и для находящихся вблизи места ОЗЗ людей и животных. В связи с этим «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей» требуют в одних случаях быстро автоматически отключать ОЗЗ, а в других – немедленно приступить к определению присоединения с ОЗЗ и затем отключать его.

Однако создать селективную и высокочувствительную защиту от ОЗЗ, пригодную для любых видов сетей с малым током замыкания на землю, до сего времени не удалось никому.

Согласно правилам технической эксплуатации (ПТЭ) п2.8.12: «В сетях генераторного напряжения, а также в сетях, к которым подключены электродвигатели высокого напряжения, при появлении однофазного замыкания в обмотке статора машина должна автоматически отключаться от сети, если ток замыкания на землю превышает 5 А. Если ток замыкания не превышает 5 А, допускается работа не более 2 ч., по истечении которых машина должна быть отключена. Если установлено, что место замыкания на землю находится не в обмотке статора, по усмотрению технического руководителя Потребителя допускается работа вращающейся машины с замыканием в сети на землю продолжительностью до 6 ч.»

Т.е. сети с изолированной нейтралью могут оставаться в работе, но не более 6 часов.

В соответствии с положениями ПУЭ в нормальных условиях работы сети должны предприниматься специальные меры защиты от возможного пробоя на землю. Для предотвращения возникновения дуги и уменьшения емкостных токов применяют компенсацию емкостных токов. Значения емкостных токов, при превышении которых требуется компенсация согласно ПУЭ и ПТЭ, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения токов требующие компенсации

Напряжение сети, кВ	6	10	20	35
Емкостный ток, А	30	20	15	10

При более низких уровнях токов считается, что дуга не загорается, или гаснет самостоятельно, применение компенсации в этом случае не обязательно.

1.3 Дугогасящий реактор

Для ограничения емкостных токов в нейтраль трансформатора вводится специальный дугогасящий реактор (рисунок 3).

Этот способ является наиболее эффективным средством защиты электрооборудования от замыканий на землю и компенсации емкостного тока. С его помощью удаётся снизить (компенсировать) ток однофазного замыкания на землю, возникающий сразу после аварии.



Рисунок 3 – Дугогасящий реактор

1.3.1 Принцип действия дугогасящего реактора

Дугогасящий реактор – электроаппарат, предназначенный для защиты от однофазных замыканий на землю в электросетях. Оборудование обеспечивает самогашение дуговых замыканий и снижает последствия прямого контакта фазного проводника с землей.

Аппарат представляет собой катушку переменной индуктивности, которая включается в цепь «нейтральная точка – земля».

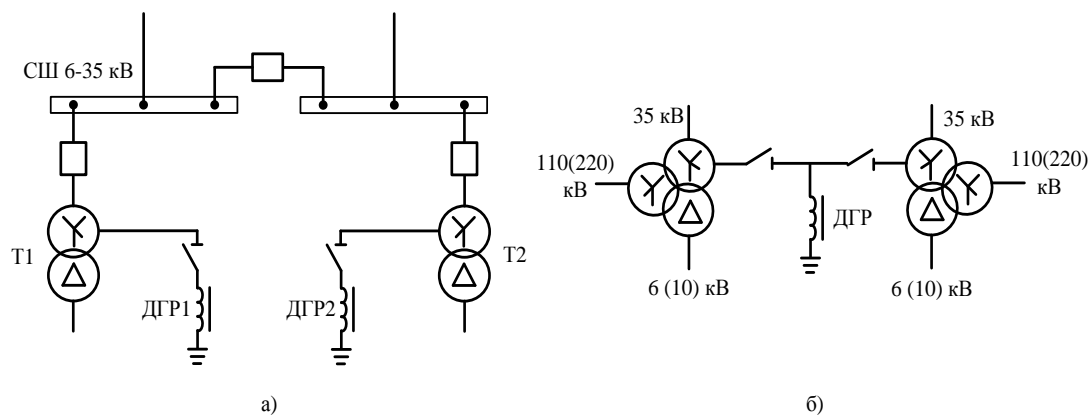
Для самогашения дуги и снижения токов при прямом устойчивом однофазном замыкании нейтраль заземляют через дугогасящий реактор. При замыкании одной из фаз на землю, возникает резонансный колебательный контур, образованный емкостью проводника и индуктивным реактором. Таким образом, емкостная составляющая компенсируется, амплитуда результирующего активного тока снижается до безопасной величины. Это позволяет прервать горение дуги при неустойчивом замыкании и во много раз снизить ток при металлическом замыкании на землю.

Главным нормативным документом регламентирующим работу, установку и надстройку ДГР является РД 34.20.179.

Дугогасящие реакторы должны подключаться к нейтральям трансформаторов, генераторов или синхронных компенсаторов через разъединители. В цепи заземления реакторов должен быть установлен трансформатор тока. Рекомендуемые схемы подключения ДГР представлены на рисунке 4.

Индуктивность ДГР подбирается из условия равенства емкостной проводимости сети и индуктивной проводимости реактора. Таким образом, происходит компенсация ёмкостного тока. Ёмкостный ток суммируется в месте замыкания равным ему и противоположным по фазе индуктивным, в результате остается только активная часть, обычно очень малая, это утечки через изоляцию кабельных линий и активные потери в ДГР (как правило, не превышают 5 А), которой недостаточно для возникновения электрической дуги

и шагового напряжения. Токоведущие цепи остаются неповреждёнными, потребители продолжают снабжаться электроэнергией.



а) подключение ДГР к трансформаторам СН; б) подключение ДГР к нейтрали силового трансформатора

Рисунок 4 – Схема подключения ДГР

Есть три вида компенсации тока при ОЗЗ катушкой:

- Полная компенсация тока $I_C = I_L = 0$
- Недокомпенсация тока $I_C > I_L$
- Перекомпенсация тока $I_C < I_L$

Дугогасящие реакторы должны иметь резонансную настройку. Это регламентирует ПТЭ п.2.8.15: «Допускается настройка с перекомпенсацией, при которой реактивная составляющая тока замыкания на землю должна быть не более 5 А, а степень расстройки – не более 5%.»

Современные ДГР имеют различные конструктивные особенности и производятся для огромного диапазона мощностей. В таблице 2 приведен ряд параметров дугогасящих реакторов разных производителей.

При выборе дугогасящего реактора рекомендуется следующий порядок; определяется максимальный емкостный ток замыкания на землю; определяется суммарная мощность реакторов из условия полной компенсации емкостного тока (резонансная настройка); определяется число реакторов (если $I_C > 50$ А, рекомендуется применять не менее двух реакторов).

Таблица 2 – Параметры ДГР

Тип реактора	РДМР	РЗДПОМ	РУОМ	ASR, ZTC	TRENCH
Охлаждение	Масляное	Масляное	Масляное	Масляное	Масляное, сухое
Исполнение	Одинарное	Одинарное	Одинарное	Одинарное, комб-ное	Одинарное, комб-ное
Класс напряжения, кВ	6, 10	6, 10, 20, 35	6, 10	6, 10, 20, 35	6, 10, 20, 35
Кратность регулирования	8–25	5	10	10	10
Диапазон мощностей, кВА	300–820 (1520)	120–1520	90–1520	50–8000	100–1000

1.3.2 Конструкция ДГР

Конструктивно ДГР близка к масляным трансформаторам: бак, заполненный трансформаторным маслом, в который помещена магнитная система с обмоткой. Сама магнитная система представляет собой регулируемую катушку индуктивности.

В настоящее время эксплуатируются различные виды ДГР, которые могут создаваться под индивидуальные условия эксплуатации, не требующие специальных настроек или изготавливаться с возможностью регулировки. В связи с этим различаются следующие конструкции магнитопровода:

- с распределенным воздушным зазором;
- плунжерного типа;
- с подмагничиванием.

В ДГР имеющих магнитопровод с распределенным воздушным зазором, регулирование может отсутствовать вовсе или осуществляется за счет переключения ответвления для ступенчатого регулирования сопротивления.

В ДГР плунжерного типа имеет магнитную систему с перемещающимися стержнями, которые плавно регулируют воздушный зазор внутри обмотки. Стержни перемещаются с помощью электропривода, что обеспечивает плавное регулирование сопротивления реактора. ДГР с подмагничиванием магнитопровода постоянным током работает по принципу магнитного усилителя. При подмагничивании магнитопровода изменяются его магнитное сопротивление и, соответственно, индуктивное сопротивление реактора.

Для отстройки индуктивности ДГР оснащаются системами управления. По конструкции систем регулирования их можно разделить на:

- ДГР с ручным переключением числа работающих витков. Этот процесс не только трудоемкий, но и требует снятия напряжения с реактора;
- ДГР с приводом, работающим автоматически под нагрузкой сети;
- ДГР не имеющие возможности регулирования индуктивности системой управления не оснащаются.

Современные конструкции дугогасящих реакторов в управлении используют микропроцессорные технологии, облегчающие возможности эксплуатации предоставлением обслуживающему персоналу расширенной информации по статистике замыканий, поиску повреждений и другим полезным функциям.

1.3.3 Недостаток ДГР

Однако, несмотря на положительные свойства ДГР, присутствует и определенная «ложка дёгтя». Как известно, емкость сети явление далеко не постоянное и её нельзя считать $= \text{const}$ в каждый момент времени.

Для более четкого понимания данного факта сеть можно представить на схеме замещения в виде конденсатора, а его ёмкость будет зависеть от следующих параметров:

- 1) напряжение, приложенное к конденсатору;

- 2) диэлектрическая проницаемость диэлектрика;
- 3) площадь обкладок;
- 4) расстояние между обкладками.

В реальной системе первый пункт определяет номинальное напряжение сети; второй пункт диэлектрическая среда между цепочкой «фаза-фаза», «фаза-земля» это воздушный промежуток для ВЛ, материал оболочки и междуфазной изоляции для КЛ; третий определяет длина линий электропередач и сечение токопроводящих жил; четвертый пункт характеризуется исполнением ЛЭП – КЛ, ВЛ, КВЛ.

Если факторами под пунктами 1, 2, 4 (для уже введенной в эксплуатацию системе электроснабжения) в принципе можно пренебречь, ввиду слабо оказываемого воздействия на емкость, т.к. напряжение сети, диэлектрическая проницаемость изоляционных сред – параметры с достаточно жестко регламентированными значениями и изменяются в очень небольших диапазонах, не оказывающих существенного влияния, а исполнение ЛЭП не меняется в принципе, то с характеристиками пункта 3 все обстоит иначе.

Ни для кого не секрет, что в электроэнергетике существуют графики планово-предупредительных ремонтов (далее – ППР), которые требуют отключения оборудования для его обслуживания и восстановления эксплуатационных характеристик, также неизбежны аварийные отключения ЛЭП и разделения сети на части.

Под действием этих событий меняется и емкость сети, а, следовательно, и емкостной ток, причем только ступенчато. А, следовательно, оперативно-диспетчерскому персоналу необходимо регулярно следить за точностью настройки ДГР, что вызывает определенные трудности, т.к. с помощью ступенчатых ДГР практически невозможно в режиме реальной эксплуатации произвести полную компенсацию емкостного тока, а в результате свести на нет все положительные свойства данного режима. Плюс ко всему это накладывает эксплуатационные сложности – при каждом переключении анцапфы

реактора необходимо отключать его от сети, что оставляет сеть на период оперативных переключений в чисто изолированном режиме работы.

Выходом из данной ситуации является внедрение плунжерных ДГР, индуктивность которых регулируется за счёт изменения воздушного зазора магнитопровода, с автоматизированной системой мониторинга реального емкостного тока и последующей настройкой под фактический режим.

Что касается организации работы релейной защиты в данном типе сетей, также возникают трудности. В режиме полной компенсации ток в месте замыкания не протекает, он ограничивается лишь активными утечками в изоляции, которые обладают очень незначительными значениями, которые не удаётся отследить РЗА, следовательно, организация защит на принципах, которые применяются в сети с чисто изолированным режимом малоэффективна.

Возможным путём решения данной проблемы является шунтирование ДГР высокоомным резистором (рисунок 5). Защита будет реагировать на ток нулевой последовательности, то есть на активную составляющую тока ОЗЗ, которая присутствует лишь в поврежденном присоединении и не зависит от режима работы ДГР, данное решение позволяет увеличить селективность РЗА.

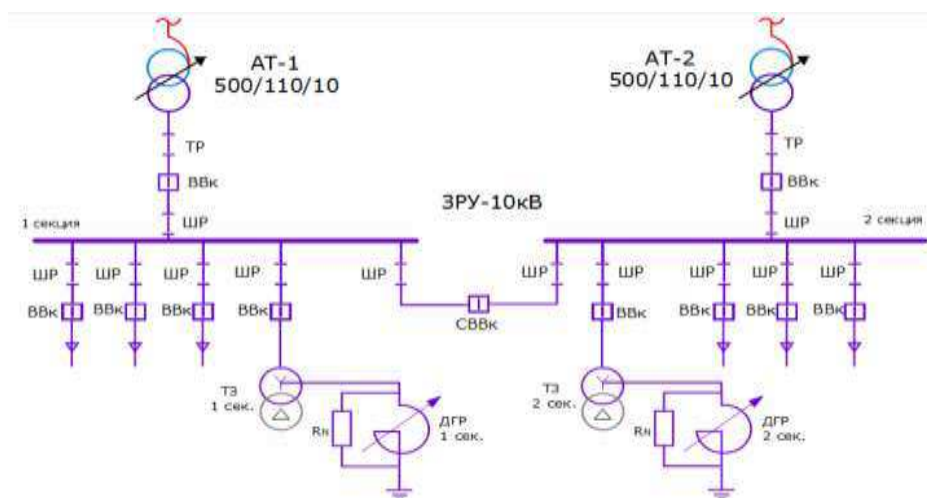


Рисунок 5 – Комбинирование заземление нейтрали ДГР+R через ТЗ в сети 10кВ

1.4 Резистор

Резистивно-заземленная нейтраль (рисунок 6) – данный вид заземления нейтрали основан на включении в нейтраль источника питания резистора, обладающего активным сопротивлением. Данный вид подразделяется на два подтипа – высокоомное и низкоомное заземление.

Высокоомный режим характеризуется применением резисторов с большим активным сопротивлением. К основным достоинствам относятся:

- Сохранение работоспособности сети при возникновении ОЗЗ, как и в случае чисто изолированного режима.
- Снижение дуговых перенапряжений переходных процессов до достаточно безопасных значений для изоляции порядка 2.0-2.5 $U_{фн}$ за счёт чисто активной составляющей омического сопротивления.
- Меньшие экономические затраты при производстве в отличие от ДГР.
- Селективная работа сигнализации за счёт наличия в месте замыкания активного тока.

К недостаткам можно отнести:

- Увеличение результирующего I_{33} примерно на 40 %, для реализации положительных свойств резистора.
- Применение в сетях с небольшими емкостными токами, так как при большом значении, накладываемая активная составляющая, которая, как было сказано выше, приводит к еще большему росту итогового значения I_{33} , в результате термическое действие дуги может привести к значительному увеличению масштабов повреждения.

Низкоомный режим характеризуется использованием резисторов с низким активным сопротивлением.

К плюсам можно отнести:

- Еще лучшее снижение дуговых перенапряжений до значений порядка 1.5-2.0 $U_{фн}$.

- Конфигурирование РЗА на простых токовых принципах.
- Малое напряжение смещения нейтрали.
- Высокая селективность РЗА, что позволяет верно определять и отключать поврежденные участки.

К недостаткам относятся:

- Увеличение тока КЗ в месте замыкания.
- Невозможность сохранить работоспособность присоединения при возникновении ОЗЗ.
- Повышенные требования к резервированию питающих присоединений.

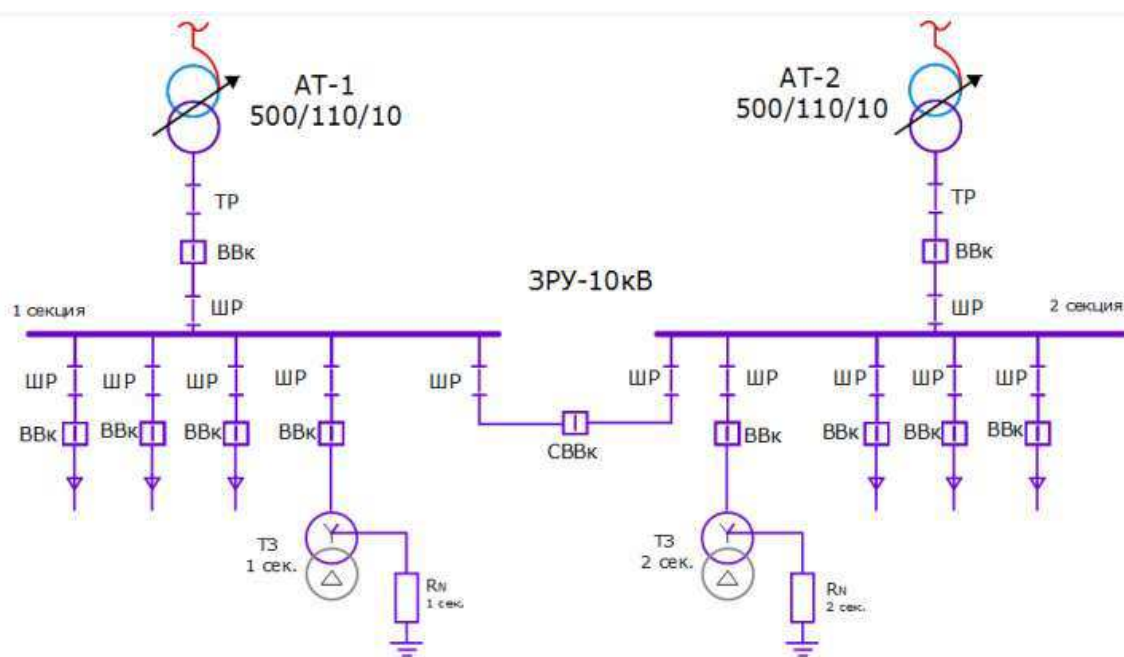


Рисунок 6 – Резистивное заземление нейтрали через ТЗ в сети 10кВ

1.4.1 Высокоомное резистивное заземление нейтрали сети 6 и 10 кВ

Главной целью высокоомного резистивного заземления нейтрали сети является ограничение дуговых перенапряжений и феррорезонансных явлений при одновременном обеспечении длительной работы сети с ОЗЗ на время поиска и отключения поврежденного присоединения оперативным персоналом.

Снижение напряжения на нейтрали и ограничение перенапряжений при дуговом замыкании на землю достигается за счет уменьшения постоянной времени разряда емкости здоровых фаз во время бестоковой паузы $t_{\text{п}}$ с помощью специально подключенного резистора RN (рисунок 7), обеспечивающего уменьшение активного сопротивления цепи протекания тока нулевой последовательности. Резистор RN подключается к сети с помощью трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ одним из двух способов.

Первый способ – резистор включается между нулевой точкой обмотки высокого напряжения ТЗН и контуром заземления (рисунок 7а).

Второй способ – нейтраль обмотки высокого напряжения ТЗ соединяют с землей, а резистор включается во вторичную обмотку трансформатора в разомкнутый треугольник (рисунок 7б), при этом магнитопровод ТЗ должен быть броневой конструкции.

Схема подключения резистора определяется структурой сети и параметрами установленного оборудования. В сетях 6 и 10 кВ наиболее приемлемы варианты подключения резистора к нейтрали ТЗН или специальных фильтров нулевой последовательности типа ФМЗО. При этом мощность устройств определяется исходя из необходимости длительной работы в режиме однофазного замыкания и обеспечения апериодического процесса разряда емкости фаз в течение бестоковой паузы $t_{\text{п}}$.

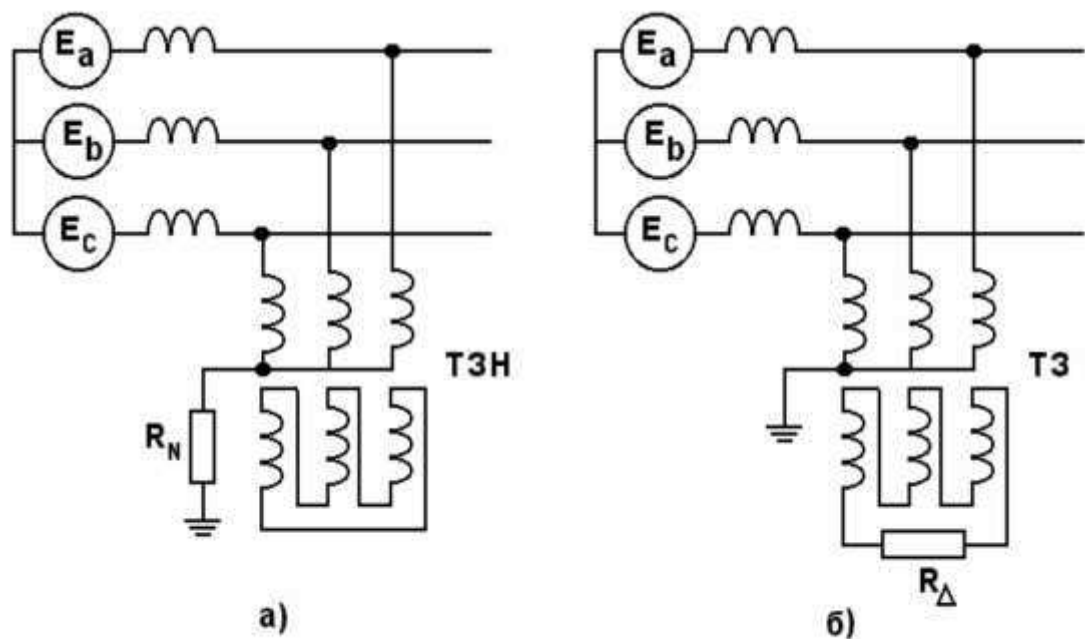


Рисунок 7 – Схемы подключения резистора к нейтрали сети

На рисунках 8, 9 указано сравнение процессов в сетях с изолированной нейтралью и нейтралью, заземлённой через высокоомный резистор. На рисунке 9 наблюдается снижение перенапряжений в 1,7 раз по сравнению с изолированной нейтралью. Это позволяет повышать надёжность потребителей электроснабжения, так как замыкание не будет переходить в многофазное, а высокоомный резистор будет потреблять часть ёмкостного тока сети.

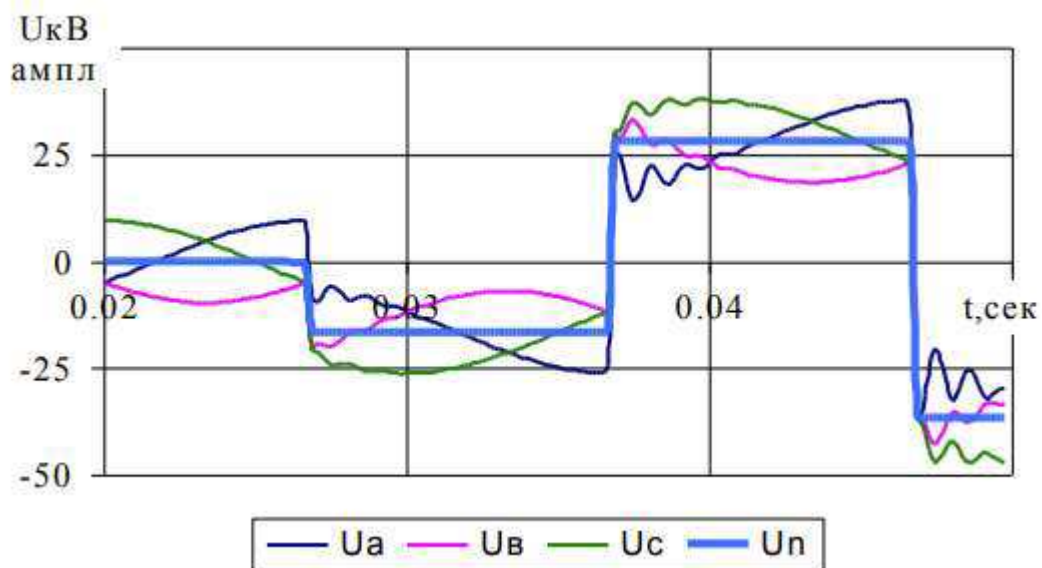


Рисунок 8 – Переходный процесс при дуговом замыкании с эскалацией U в сети 10 кВ с изолированной нейтралью

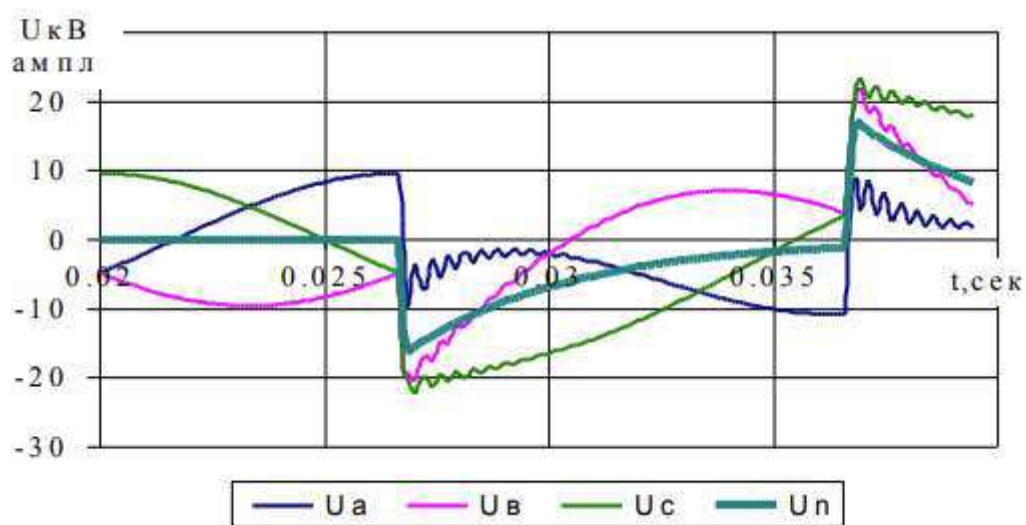


Рисунок 9 – Переходный процесс при дуговом замыкании с эскалацией U в сети 10 кВ с нейтралью, заземленной через высокоомный резистор

С целью сохранения преимуществ изолированной нейтрали в сетях 6-35 кВ следует применять высокоомный резистор. Сохраняя питание у потре-

бителей, высокоомный резистор защищает оборудование (в особенности асинхронные двигатели) от повреждений высоким уровнем перенапряжений.

1.4.2 Низкоомное резистивное заземление нейтрали сети 6 и 10 кВ

Главной целью низкоомного резистивного заземления нейтрали сети является быстрое отключение ОЗЗ релейной защитой и максимальный охват обмоток электрических машин (двигателей, генераторов, трансформаторов) защитой от ОЗЗ. При этом также обеспечивается подавление перенапряжений и феррорезонансных явлений.

Низкоомное резистивное заземление нейтрали сети осуществляют с помощью специального трансформатора заземления нейтрали ТЗН со схемой соединения обмоток Y/Δ , согласно рисунку 7а. Резистор R_N включают между нулевой точкой обмотки ВН и контуром заземления.

Сопротивление резистора выбирают наименьшим, исходя из двух условий: предотвращение перенапряжений при ОЗЗ (см. формулу 4), резистор должен создавать ток не менее емкостного тока ОЗЗ; обеспечение селективного срабатывания защит на отключение ОЗЗ.

2 Аналитическая часть

2.1 Анализ компенсации емкостных токов

При ОЗЗ одна из фаз соединится с землёй, и относительно земли напряжение на двух других фазах возрастёт в $\sqrt{3}$. То есть, до этого на них было фазное напряжение, после ОЗЗ стало линейным. Для всей сети это испытание повышенного напряжения. Это может выявить слабое место, в котором возникает замыкание на землю уже другой фазы и начинается двойное замыкание на землю (замыкание между фазами). Опасность существует и в месте случившегося ОЗЗ, т.к. ток движется, греет, плавит, если это кабельная линия, то плавится изоляция соседних фаз, замыкание на землю переходит в междуфазное. Это аварийный режим, его отключает релейная защита. Если в сети есть сельские сети (высоковольтные линии), есть опасность приближения к месту повреждения людей и животных. При наличии в сети ОЗЗ, согласно ПТЭЭП, [3] отключение линии некоторое время не производится (до 6 часов), за это время необходимо в оперативном порядке искать место повреждения.

ПТЭЭП обязывает устанавливать установки компенсации емкостных токов, если их расчётные величины выше определённых значений (таблица 1).

Установка компенсации емкостных токов состоит из нейтралеобразующего трансформатора и ДГР (компенсирующего оборудования). У нейтралеобразующего трансформатора выведен наружу вывод нейтрали на стороне высокого напряжения. Обмотка высокого напряжения включается в сеть через выключатель. Выведенная нейтраль соединяется с ДГР. Обмотка низкого напряжения трансформатора может быть использована для питания собственных нужд подстанции (в процессе дугогашения не участвует).

Важной особенностью ДГР является, то что её индуктивность можно регулировать плавно или ступенчато.

Установка компенсации входит в состав системы шин к которой подключены отходящие кабельные линии. После ввода в работу установки компенсации емкостных токов, полностью или частично емкости компенсируются за счёт индуктивности катушки. Регулировка её индуктивности нужна для того чтобы в зависимости от работы сети изменять индуктивность и подстраиваться под сеть.

При возникновении ОЗЗ к точке короткого замыкания будет подключена не только эквивалентная емкость всей оставшейся сети (рисунок), за исключением повреждённой фазы, но и индуктивное сопротивление катушки, которое скомпенсирует своим током ток короткого замыкания.

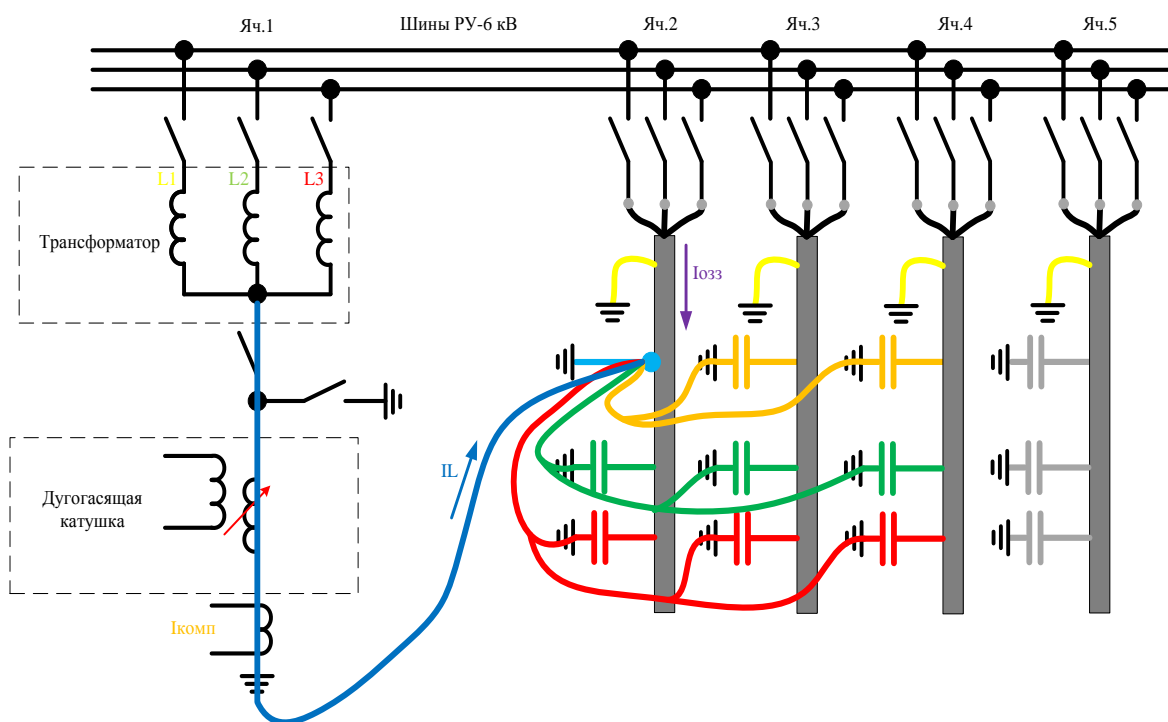


Рисунок 10 – Компенсация емкостных токов. Действие ДГР

2.2 Применение различных способов заземления нейтрали различных стран мира

Далее рассмотрим реальную практику применения различных способов заземления нейтрали в сетях среднего уровня напряжений, на примере различных стран мира. (Таблица 3)

Таблица 3 – Режимы заземления в сетях 3-69кВ различных стран мира

Государство	Метод заземления нейтрали			
	Изолированная	Резонансно-заземленная	Резистивно-заземленная	Глухозаземленная
Россия	+	+	+	
Австралия			+	+
Канада			+	+
США			+	+
Испания		+	+	+
Португалия			+	
Франция		+	+	
Япония			+	
Германия		+	+	
Австрия		+	+	
Бельгия			+	+
Великобритания			+	+
Швейцария		+	+	
Финляндия	+	+	+	
Италия		+	+	
Чехия		+	+	
Словакия		+	+	
Швеция		+	+	
Норвегия		+	+	

В настоящее время в мире наработан значительный опыт по эксплуатации различных видов заземления нейтрали в сетях среднего напряжения. Но, к сожалению, в решении вопроса выбора того или иного режима в России порой до сих пор опираются на морально устаревшие нормативно-технические документы. В то же время в Европе и США активно применяется практика проведения реальных испытаний в процессе эксплуатации сетей с проведением последующего математического анализа, результатом чего становится внесение корректировок в актуальные нормативные документы, касающиеся данной темы.

Однако, несмотря на некоторые тормозящие факторы, Россия имеет не сильное отставание от зарубежья. На сегодняшний день также проводятся активные исследования, и разрабатывается новая нормативно-техническая документация, но, к сожалению, это носит частный характер, в формате

внутренних документов в дополнение к основным государственным, в таких организациях как ПАО «Россети Волга», АО «Газпром», АО «Транснефть», ПАО «Россети Сибирь».

Как видно из таблицы 3, чисто изолированный режим применяется на сегодняшний день только в двух странах – России и Финляндии. Однако в отличие от России, в Финляндии применение данного способа является скорее вынужденной мерой, так как удельное сопротивление грунта на её территории в 20-50 раз превышает среднеевропейские значения, и обеспечить чувствительность защит методом глухого или резистивного заземления не представляется возможным. Стоит отметить, что РЗА в этих сетях работает на отключение, а не на сигнал, т.е. основной задачей изолированной нейтрали в Финляндии является повышение чувствительности защит, а не повышение бесперебойности электроснабжения, как в России.

В нашем государстве режим изолированной нейтрали, согласно данным источника, используется в порядка 80 % сетей класса напряжения 6-35кВ, примерно 20 % реализованы на основе ДГР. Однако в большинстве стран, согласно таблице 3, применяется резистивный и чуть менее часто резонансный режим. В силу всех описанных недостатков изолированной нейтральной точки, многие страны начали активно отказываться от применения данных методов еще в 50-ых годах прошлого века.

В России также применяется режим резистивного заземления, но его внедрение на смену устаревшим методам осуществляется крайне замедленно. Скорее всего в силу того, что в единой нормативно-технической базе России отсутствуют узконаправленные рекомендации для его реализации, в отличие от изолированного и компенсированного режима, относительно которых имеется наработанная база руководящих документов (далее – РД). В то время как для резистивного режима имеется всего две выдержки: в которых сказано «работа электрических сетей напряжением 3–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор». «В сетях собственных нужд 6 кВ блочных

электростанций допускается режим работы с заземлением нейтрали сети через резистор».

Глухозаземленный режим, согласно российской нормативно-технической документации, запрещен. Однако он распространен в небольшом числе стран.

Кроме описанного выше опыта, также есть опыт применения комбинированного заземления через ДГР шунтированного резистором, который встречается на ЛЭП 20кВ в Германии, где ДГР гасит кратковременные пробои, а резистор включается в работу с помощью специального однофазного силового выключателя, только в случае если ОЗЗ имеет устойчивый характер для обеспечения селективного определения линии.

2.3 Сравнение оборудования, предназначенное для защиты от однофазных замыканий на землю в электросетях

1. Длительность нагрузки

Руководство по эксплуатации ДГР регламентирует правила использования реактора: – «При максимальном токе реактора, максимально допустимой температуры окружающей среды в случае однофазного замыкания на «землю», продолжающегося более 6 часов, необходимо установить наблюдение за температурой верхних слоев масла реактора. [6] Это значит, что длительность загрузки данной установки составляет более 6 часов, но с необходимым контролем за температурным режимом.

Для высокоомных резисторов отечественная компания «ЭНСОНС» заявляет длительность загрузки 24 часа. Продукция данного производителя находится в процессе аттестации ПАО «Россети». [7]

Для низкоомных резисторов компания «ЭНСОНС» заявляет длительность загрузки 10 секунд. [13]

2. Цена оборудования

Современный мощный резистор значительно дешевле регулируемого ДГР. [10] Это можно заметить и по составляющим его компонентам. Так же для контроля и точной подстройки параметров к изменяющейся емкости сети современных ДГР с автоматическим регулированием требуется автоматика управления дугогасящими реакторами (шкафы и система управления ДГР), что существенно удорожает систему.

3. Эффективность оборудования

Индуктивные пути разряда емкости сети через дугогасящие реакторы имеют сопротивления в 4,6 – 7,5 раз ниже активных путей разряда через резисторы, [11] следовательно, установка заземляющего резистора в нейтраль сети приводит к увеличению полного установившегося тока замыкания на землю в режиме устойчивого замыкания. В связи с этим резистивное заземление обладает дополнительными потерями энергии в нейтрале заземляющем резисторе при установившемся ОЗЗ.

При заземлении нейтрали через низкоомный резистор на всех присоединениях осуществляется простая токовая защита от замыканий на землю с действием на отключение поврежденного элемента без выдержки времени.

4. Срок службы

Гарантийный срок фирмы «Бреслер» составляет 5 лет со дня ввода в эксплуатацию [6], но не более шести лет со дня отгрузки с предприятия – изготовителя, если иное не оговорено в договоре на поставку. Изготовитель безвозмездно заменяет или ремонтирует реактор, если в течение гарантийного срока потребителем будет обнаружено несоответствие реактора требованиям технических условий (техническим данным, оговоренным в настоящем руководстве) при соблюдении потребителем условий транспортирования, монтажа и эксплуатации. Изготовитель гарантирует соответствие реактора со встроенным фильтром АДМК требованиям технических условий ТУ 3411-039-71026440 – 2013 при соблюдении потребителем условий транспортирования, хранения и эксплуатации, установленных техническими условиями и данным руководством по эксплуатации.

Срок эксплуатации высокоомных резисторов РЗН ВО 6 – 35 фирмы «ЭНСОНС», как заявляет производитель 30 лет, гарантийный срок составляет 3 года. [7] Срок эксплуатации низкоомных резисторов РЗН НО 6 – 35 той же фирмы составляет 30 лет, гарантийный срок 3 года. [13]

5. Эксплуатация

При эксплуатации реактора необходимо руководствоваться указаниями действующих «Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок» и «Правил технической эксплуатации электроустановок потребителей». [6]

Все работы должны производиться только после отключения реактора и проверки отсутствия напряжения на его вводах.

Включение и работа реактора допускается только при наличии заземления.

При обслуживании реактора необходимо учитывать, что трансформаторное масло является легковоспламеняющейся жидкостью, имеет высокую температуру горения и трудно поддается тушению. Поэтому все работы, и особенно связанные со сваркой, электропайкой, следует производить в соответствии с противопожарными нормами и правилами.

Запрещается приближаться к реактору в случае возникновения режима ОЗЗ на расстояние менее 8 метров.

Реактор допускает работу при номинальном напряжении и наибольших предельных токах, а также при наибольшем рабочем напряжении при мощности не более номинальной в течение не менее 6 ч.

Контроль работоспособности реактора осуществляется по показаниям прибора автоматической настройки реактора, светозвуковому индикатору наличия замыкания на землю, установленному на шкафу конденсаторных батарей.

В процессе эксплуатации реактора осуществляется контроль уровня масла по маслоуказателю и температуры верхних слоев масла по термометру (термосигнализатору).

В течение двенадцати месяцев с даты изготовления реактора происходит процесс полной пропитки обмоток, при этом уровень масла в баке может незначительно уменьшиться. В данной ситуации требуется долить масло до отметки на маслоуказателе, соответствующей температуре окружающей среды.

В случае достижения температуры верхних слоев масла + 100°C, реактор следует отключить от сети выключателем.

Последующее включение реактора в сеть допускается после его полного охлаждения, но не ранее чем через 12 часов.

В случае с резистором необходимо проводить контроль за резистивными пластинами. Это несомненный плюс данного оборудования.

Ремонтопригодность, при необходимости проведения обслуживания или ремонтных работ – при снятии кожуха появляется свободный доступ ко всем комплектующим резистора. Наборные пластины легко осмотреть, при необходимости – полностью либо частично заменить.

Также при выборе резистивно – заземлённого способа заземления нейтрали осуществляется экономия места на объекте, уменьшение вдвое затрат на эксплуатационное оборудование. [7]

2.4 Обзор производителей

1 Научно – производственное предприятие «БЕСЛЕР»

Предприятие было основано на базе научно-исследовательской лаборатории кафедры ТОЭ Чувашского государственного университета им. И.Н. Ульянова, а ее работники составили основу коллектива предприятия. Примечательно, что данная лаборатория в 70–х годах прошлого века работала над созданием устройств РЗА с применением новой для того времени микросхемотехнической элементной базы, а в 80–х годах одной из первых в СССР выполняла опытную разработку микропроцессорной защиты генератора. За время, прошедшее с момента создания, накоплен богатейший опыт и традиции. [6]

Сегодня на предприятии трудится более 250 человек. Большая часть сотрудников занята разработкой; примерно, четверть – в производстве; другие – сопровождением выпущенной продукции и решением иных производственных задач. Высокий научно-технический потенциал предприятия во многом определяется квалификацией специалистов: 8 сотрудников имеют ученые степени доктора и кандидата технических наук; 5 сотрудников являются аспирантами; более 90% сотрудников имеют высшее образование. Ведущие специалисты, имея многолетний опыт разработки устройств релейной защиты и автоматизации, ведут целевую подготовку специалистов, преподают на кафедре ТОЭ и РЗА Чувашского государственного университета, руководят практикой студентов, дипломным и курсовым проектированием.

«НПП Бреслер» является надежным партнером в решении наукоемких задач релейной защиты и автоматизации (РЗА) электроэнергетических систем: от НИОКР до поставки и наладки разработанных и выпускаемых микропроцессорных устройств РЗА. В эксплуатации сегодня находится более 6000 терминалов производства «НПП Бреслер», установленных в России и в странах ближнего и дальнего зарубежья. За время работы предприятия сформирован солидный ряд наукоемких изделий для релейной защиты и автоматизации электроэнергетических систем.

Предприятие располагает собственной современной, хорошо оснащенной производственной базой. Для производства используется современное технологическое оборудование ведущих фирм мира.

2 Компания «ЭНСОНС»

Компания ЭНСОНС – это инновационное электромашиностроительное предприятие специализирующееся на проектировании и изготовлении систем автоматической компенсации емкостных токов и систем снижения токов короткого замыкания. [7]

«ЭНСОНС» – единственный российский производитель полного ассортимента электротехнического оборудования по системам компенсации емкостных токов.

Логика создания и локализации компании не случайна и связана не только с логистическо – географическим преимуществом расположения предприятия в максимально удобной доступности как к европейской так и восточной частям России. Уральский Федеральный округ, и город Екатеринбург в частности, – одни из областей – лидеров по производству тяжелого электромашиностроения в РФ. При этом многолетний опыт подобного развития отрасли в регионе явился своеобразной кузницей профессиональных кадров – конструкторов, расчетчиков, проектировщиков, производственников, двигающих данное направление вперед.

Результатом объединения ведущих специалистов – конструкторов, производственников и управленцев с многолетним производственным опытом на фоне протекающих в Российской энергетике процессов импортозамещения и роста потребности в энергоэффективном, инновационном оборудовании, явилось создание в 2014 году компании ЭНСОНС, отвечающей всем актуальным требованиям данного рынка.

В настоящий момент, компания имеет ряд представительств, в том числе, в Москве и Санкт–Петербурге, Казахстане и Белоруссии. «ЭНСОНС» занимает активную позицию на рынке. Большими темпами модернизирует производство и внедряет инновационные решения для более эффективной работы производимой продукции.

3 Компания ООО «Болид»

Общество с ограниченной ответственностью «Болид» было создано в 1991 году на базе коллектива лаборатории композиционных резистивных материалов Сибирского НИИ Энергетики [17]. Круг задач, решаемых сотрудниками предприятия, достаточно широк – от экспериментальных исследований в сетях 6–35 кВ, математического моделирования переходных процессов, анализа аварийных ситуаций – до разработки и серийного выпуска композиционных электропроводящих и диэлектрических материалов, в том числе и нанотехнологий многофункционального назначения; производство на основе

композиционных материалов изделий электроэнергетического и бытового назначения.

На сегодняшний день численность персонала предприятия ООО «Болид» составляет более 100 человек. Общая площадь, занимаемая основным технологическим процессом, экспериментальным участком и научно-исследовательским отделом, составляет более 3500 м². Система обеспечения качества продукции, действующая на предприятии, включает в себя сплошной многоступенчатый контроль качества. Соответствие продукции государственным и международным стандартам, а также специальным отраслевым требованиям подтверждено сертификатами соответствия и заключениями аттестующих органов.

Основное направление деятельности предприятия – производство высоковольтных резисторов для заземления нейтрали сетей 3–35 кВ. На сегодняшний день в распределительных кабельно-воздушных сетях России (ПАО «Россети», ПАО «Газпром», ПАО «ЛУКОЙЛ»), Белоруссии, Казахстана, Грузии, Украины, Узбекистана успешно эксплуатируются более 2500 резисторов на номинальное напряжение сети 3, 6, 10, 20, 35 кВ.

Резисторы серии РЗ и РЗ1 производства ООО «Болид» в 2017 году успешно прошли аттестацию ПАО «Россети» и рекомендованы для применения на их объектах.

2.5 Параметры. Характеристика оборудования

Научно – производственное предприятие «БЕСЛЕР» производит: устройства РЗА (Защиты подстанционного оборудования класса напряжения 6-35 кВ, 110–220 кВ; общеподстанционное оборудование), оборудование заземления нейтрали (дугогасящие реакторы разного типа, фильтры нейтралеобразующие присоединительные, переносные приборы настройки ДГР, комбинированные шкафы автоматики), регистраторы аварийных событий, программно–аппаратный комплекс определения места повреждения линий элект-

тропередачи 6–750 кВ, устройства быстродействующего автоматического ввода резерва для подстанций 0,4–6–35 кВ.

Реактор типа АДМК, данного производителя «НПП Бреслер» является одним из самых практичных типов дугогасящих реакторов.

Реактор состоит из фильтра нейтралеобразующего присоединительного, статической катушки индуктивности, размещенных в общем баке и шкафа конденсаторных батарей, совместно размещенных на одной общей раме.

Фильтр и катушка индуктивности, совместно образующие силовую часть и помещенные в маслонеполненный бак с крышкой, состоят из магнитопровода, обмоток нейтралеобразующей части, собранных по схеме «зигзаг с выведенной нейтралью», рабочей, нагрузочной и сигнальной обмоток реакторной части. Реактор заполнен трансформаторным маслом. В реакторах применяются радиаторы, состоящие из ряда вертикальных охлаждающих труб, образующих параллельные пути сверху вниз для масла, циркулирующего внутри них.

Основные технические характеристики:

Класс напряжения сети: 6, 10 кВ;

Номинальная мощность: от 80 до 1600 кВА.

На рисунке 11 представлена схема электрическая принципиальная реактора АДМК.

A, B, C – высоковольтные вводы трансформаторной части, N – вывод нейтрали;

W_{раб.} – рабочая обмотка (включается между нейтральной точкой фильтра и землей);

W_{сигн.} – сигнальная обмотка (предназначена для измерения напряжения нулевой последовательности, а также для наложения импульса);

W_{нагр.} – нагрузочная обмотка (предназначена для регулирования индуктивности дугогасящего реактора за счет подключения конденсаторов).

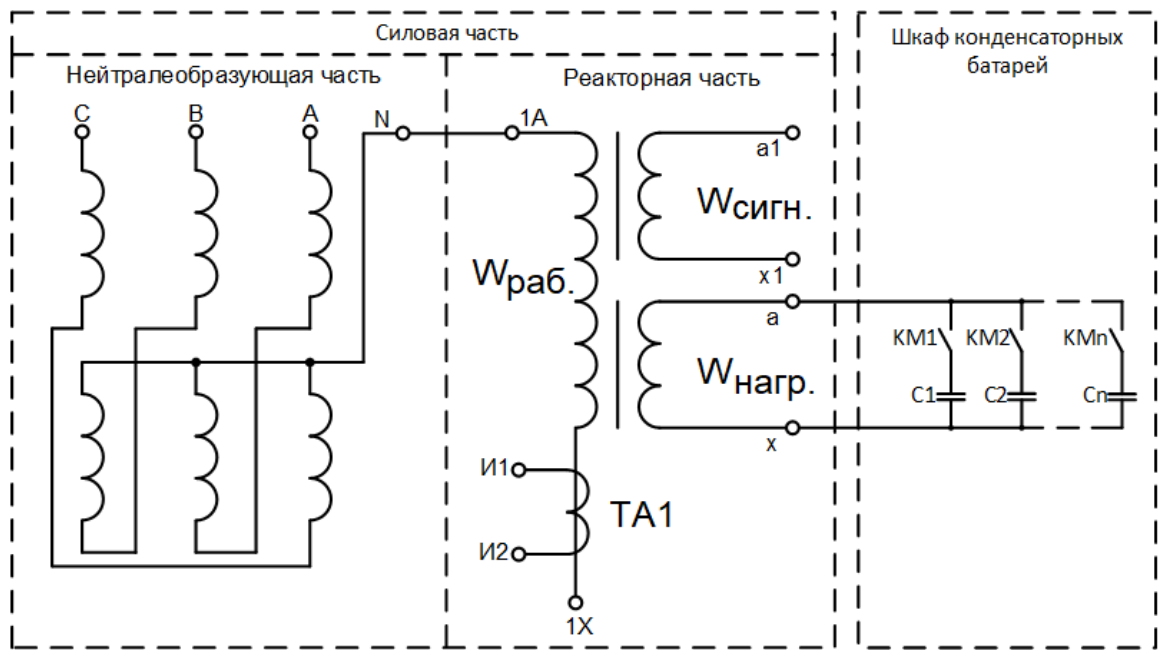


Рисунок 11 – схема электрическая принципиальная

Таблица 4 содержит полный список основных параметров и характеристик реактора. [6]

Таблица 4 – Основные параметры и характеристики реактора

Тип реактора	Мощность, кВА	Номинальное напряжения встроенного фильтра, кВ	Номинальное напряжение обмоток, кВ			Диапазон регулирования тока реактора ($I_{\min} \div I_{\max}$), А
			W _{раб.}	W _{нагр.}	W _{сигн.}	
АДМК-80/6 АДМК-80/10	80	6,6; 11	6,6/√3; 11/√3	0,5	0,1	1÷21; 1÷13
АДМК-100/6 АДМК-100/10	100	6,6; 11	6,6/√3; 11/√3	0,5	0,1	1÷26; 1÷15
АДМК-125/6 АДМК-125/10	125	6,6; 11	6,6/√3; 11/√3	0,5	0,1	1÷33; 1÷20
АДМК-160/6 АДМК-160/10	160	6,6; 11	6,6/√3; 11/√3	0,5	0,1	2÷42; 2÷25
АДМК-200/6 АДМК-200/10	200	6,6; 11	6,6/√3; 11/√3	0,5	0,1	2÷52; 2÷31

Продолжение таблицы 4

Тип реактора	Мощность, кВА	Номинальное напряжения встроенного фильтра, кВ	Номинальное напряжение обмоток, кВ			Диапазон регулирования тока реактора ($I_{min} \div I_{max}$), А
			Wраб.	Wнагр.	Wсигн.	
АДМК-250/6 АДМК-250/10	250	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	2÷65; 2÷39
АДМК-300/6 АДМК-300/10	300	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	2÷79; 2÷47
АДМК-400/6 АДМК-400/10	400	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	2÷104; 2÷63
АДМК-500/6 АДМК-500/10	500	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	5÷131; 5÷78
АДМК-630/6 АДМК-630/10	630	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	5÷165; 5÷100
АДМК-800/6 АДМК-800/10	800	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	5÷210; 5÷125
АДМК-1000/6 АДМК-1000/10	1000	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	5÷262; 5÷157
АДМК-1250/6 АДМК-1250/10	1250	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	5÷328; 5÷196
АДМК-1600/6 АДМК-1600/10	1600	6,6; 11	6,6/ $\sqrt{3}$; 11/ $\sqrt{3}$	0,5	0,1	5÷419; 5÷251

Компания «ЭНСОНС» производит [7]: сухие трансформаторы ТС(3), реакторы ДГР, шкафы и системы управления ДГР, резисторы заземления нейтрали, блоки для ОРУ (блоки трансформаторов тока, блоки трансформаторов напряжений, блоки опорных изоляторов и др.).

Важно отметить, что данная отечественная компания производит не только ДГР, но и резисторы высокоомного (РЗН ВО 6-35) и низкоомного сопротивления (РЗН НО 6-35).

В случае регулируемого типа исполнения стандартный шаг регулирования величины сопротивления составляет 10%.

Основные технические характеристики РЗН ВО 6-35:

- Номинальное напряжение 6, 10, 15, 20, 35 кВ
- Номинальный ток от 0,75 до 56 А
- Номинальное сопротивление от 400 до 8000 Ом

Основные технические характеристики РЗН НО 6-35:

- Номинальное напряжение 6, 10, 15, 20, 35 кВ
- Номинальный ток от 8 до 450 А
- Номинальное сопротивление от 30 до 500 Ом

Есть возможность комбинированного исполнения резисторов с нейтралеобразующим трансформатором в одном кожухе.

Компания ООО «Болид» направлена на более узкое производство. [17]
Продукция компании: резисторы для заземления нейтрали, нагрузочные устройства, светотехника, композитные материалы, светотехника.

Характеристика высокоомных резисторов:

- Номинальное напряжение сети 6, 10, 35 кВ
- Номинальный ток резистора от 1 до 2000 А
- Номинальная мощность до 200 кВт
- Допустимое превышение температуры корпуса резистора над максимальной температурой окружающей среды, не более 115 °С

Характеристика низкоомных резисторов:

- Номинальное напряжение сети 6, 10 кВ
- Номинальное сопротивление 15...250 Ом
- Режим работы при протекании номинального тока – кратковременный (не менее 10 секунд)

3 Практическая часть

3.1 Характеристика ПС 110 кВ «КСК» ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго»

ПС № 26 «КСК» относится к электрическим сетям филиала ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго». Расположена по адресу Республика Хакасия, г. Черногорск, оказывает услуги по электроснабжению в г. Черногорске.

ПС «КСК» 110/35/10 введена в эксплуатацию в 1963 году. На ПС установлено 2 силовых трёхобмоточных трансформатора мощностью 31500 кВА. Питание собственных нужд осуществляется двумя трансформаторами классом напряжения 10/0,23 мощностью 160 кВА по 1 секции и 100 кВА по 2 секции.

На ОРУ 35 кВ установлено 5 высоковольтных выключателя. Также на ПС в ЗРУ установлено 20 выключателей на класс напряжения 10 кВ. Все выключатели маслонаполненные, за исключением одного вакуумного. Имеются 4 разъединителя на класс напряжения 110 кВ; 12 разъединителей на 35 кВ; 8 разъединителей на класс напряжения 10 кВ.

Грозозащита ПС «КСК» выполнена на стороне 110 кВ разрядниками РВС – 110 8шт., на стороне 35 кВ разрядниками РВС – 35 6 шт., на стороне 10 кВ РВО – 10 6 шт.

Расшифровка:

Р – разрядник;

В – вентильный;

О – облегчённый;

С – стационарный

Общее количество масла в аппаратуре ПС № 26 «КСК» составляет 73559 кг.

Трансформаторы 110 кВ марки ТДТН – 31500/110.

Расшифровка:

Т — трехфазный;

Д — охлаждение с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла. Внутри радиаторов установлены вентиляторы, которые включаются по указанию реле, контролирующее температуру масла;

Т — трехобмоточный;

Н — регулирование напряжения под нагрузкой.

Таблица 5 – Технические данные трансформатора

Тип	Номинальная мощность, кВА	Номинальные напряжения, кВ			Потери, кВт		Напряжение КЗ, %			Ток ХХ, %
		ВН	СН	НН	ХХ	КЗ	ВН - СН	ВН - НН	СН - НН	
ТДТН - 31500/110	31500	115	38,5	11	75	225	17,4	10,5	6,2	5

Год выпуска первого трансформатора – 1966, год выпуска второго трансформатора – 1964.

Количество ступеней положения выключателя РПН – 9.

На трансформаторах установлена дифференциальная защита, максимальная токовая защита 110 и 10 кВ, обдув, защита от перегрузки, газовая защита.

На данный момент компенсирующих устройств емкостных токов на ПС «КСК» в сети 10 кВ нет.

На рисунке 12 выполнена схема электрических соединений ПС.

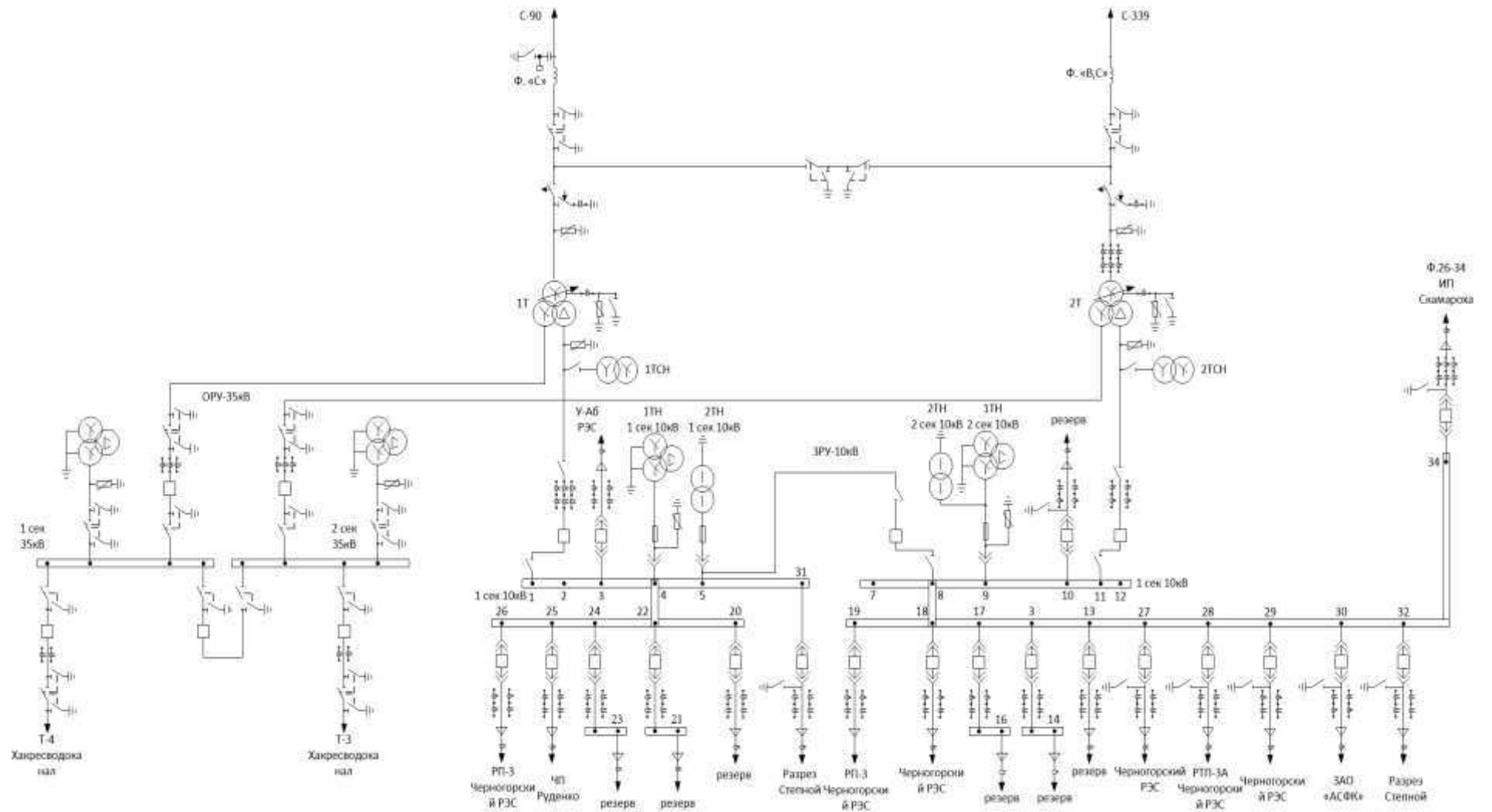


Рисунок 12 – Схема электрических соединений ПС «КСК»

3.2 Расчёт ёмкостных токов

Произведём расчёт ёмкостных токов и выбор ДГР для ПС 110кВ №26 КСК г. Черногорск.

Ёмкостной ток кабельной и высоковольтной линии определяется по формуле (1):

$$I_{сл} = 1,1 \cdot I_{суд} \cdot L \text{ [A]} \quad (1)$$

Где L – длина ЛЭП, км;

$I_{суд}$ – Удельный ёмкостной ток замыкания на землю.

Удельный ёмкостной ток замыкания на землю ЛЭП приведён ниже (рисунок 13).

Характеристика линии передачи	Токи однофазного замыкания, А/км, при напряжении, кВ		
	6	10	35
Воздушные линии			
Одноцепная без троса	0,013	0,0256	0,078
Одноцепная с тросом	—	0,032	0,091
Двухцепная без троса	0,017	0,035	0,102
Двухцепная с тросом	—	—	0,11
Кабельные линии			
Номинальные сечения жил, мм ²			
10	0,33	0,46	—
16	0,37	0,52	—
25	0,46	0,62	—
35	0,52	0,69	—
50	0,59	0,77	—
70	0,71	0,9	3,7
95	0,82	1	4,1
120	0,89	1,1	4,4
150	1,1	1,3	4,8
185	1,2	1,4	5,2

Рисунок 13 – Удельный ёмкостной ток замыкания на землю ЛЭП

Суммарный ёмкостной ток по шинам определяется, как сумма ёмкостных токов фидеров, подключенных к шине.

Произведём расчёт ёмкостных токов однофазного замыкания на землю для ф.26–27, результаты вычисления сведём в таблицу 6.

Определение длинны ЛЭП.

$$L_{вд} = 0,156 + 0,783 = 0,939 \text{ км}$$

$$L_{кл} = 0,06 + 0,005 = 0,065 \text{ км}$$

Удельный емкостной ток замыкания на землю для ВЛ и КЛ:

$$I_{\text{СудВЛ}} = 0,0256 \text{ А/км}$$

$$I_{\text{СудКЛ120}} = 1,1 \text{ А/км}$$

$$I_{\text{СудКЛ35}} = 0,69 \text{ А/км}$$

Найдём ёмкостной ток фидера 26–27.

$$I_{\text{Сф}} = 1,1 \cdot (0,939 \cdot 0,0256 + 0,06 \cdot 1,1 + 0,005 \cdot 0,69) = 0,103 \text{ А}$$

Таблица 6 – Расчёт емкостных токов замыкания на землю в сети 10 кВ
ПС №26 «КСК»

Фидера	Дли- на L, ВЛ, км	Длина L, КЛ, км	Ис.уд ВЛ, А/км	Ис.уд КЛ, А/км	U, кВ	Емкостной ток фиде- ра	ΣI по 1 с.ш.	ΣI по 2 с.ш.
1	2	3	4	5	6	7	8	9
26-03	2,77	0.654/0.21/0.2	0,0256	1.1/0.9/1.0	10	1,297	9,285	48,096
26-10			0,0256		10	0,000		
26-14/15			0,0256		10	0,000		
26-16/17			0,0256		10	0,000		
26-18	4,505	0.09/0.12	0,0256	1.1/1.6	10	0,447		
26-19		3,07		1,6	10	18,730		
26-21/22	0,939		0,0256		10	0,026		
26-23/24	0		0,0256		10	0,000		
26-25	1,718	0,14	0,0256	1,1	10	0,218		
26-26		3,2		1,6	10	5,632		
26-27	0,939	0,065	0,0256	1,1	10	0,105		
26-28		2,8		1,6	10	24,022		
26-29	6,916	0.15/0.03	0,0256	1.1/1.0	10	0,409		
26-30		0.445/0.095		1.1/1.3	10	0,674		
26-31		1,2		1,6	10	2,112		
26-32		1,2		1,6	10	2,112		
26-34		1,32		1,1	10	1,597		

3.3 Расчёт мощности ДГР

Требуется выбрать мощность и тип дугогасящего реактора в сети $U_{ном}=10$ кВ. Суммарный емкостной ток замыкания на землю по 2 с.ш. составляет $I_c=48,096$ А. Поскольку емкостный ток ОЗЗ превышает допустимый 20 А для сети 10 кВ, требуется его компенсация. Мощность ДГР, согласно РД 34.20.179 [19], определяется по формуле 2.

$$Q_k = I_c \cdot \frac{U_{ном}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Определим мощность для ДГР на 2 с.ш.

$$Q_k = 48,096 \cdot \frac{10}{\sqrt{3}} = 277,68 \text{ кВА}$$

Поскольку данные о развитии сети отсутствуют, полученную расчетную мощность ДГР необходимо умножить на 1,25.

$$Q_k = 277,68 \cdot 1,25 = 347,1 \text{ кВА}$$

В качестве дугогасящего реактора выбираем АДМК–400/10.

А – реактор со встроенным фильтром;

К – конденсаторное регулирование;

М – масляный;

Д – дугогасящий.

3.4 Расчёт сопротивления и выбор резистора

Будем использовать высокоомное резистивное заземление нейтрали для 1 с.ш., т.к. к ПС №26 КСК г. Черногорск нет присоединения двигателей, генераторов, трансформаторов, присоединены маломощные потребители. Главной целью является ограничение дуговых перенапряжений и феррорезонансных явлений при одновременном обеспечении длительной работы сети с ОЗЗ на время поиска и отключения поврежденного присоединения оперативным персоналом.

Высокоомный резистор применяется в сетях с емкостным током замыкания на землю не более 10 А [24]. (Подробнее в приложении 1).

Выполним расчёт параметров высокоомного резистора в сети $U_{ном}=10$ кВ (для 1 с.ш.). Суммарный емкостной ток замыкания на землю по 1 с.ш. составляет $I_c=9,285$ А.

Для обеспечения полного разряда емкостей фаз за время $t_{п}$, равное 0,008 – 0,010с, сопротивление резистора выбирают из условия, чтобы активная составляющая тока замыкания на землю I_R . была равна или больше емкостной составляющей I_C (3).

$$I_R \geq I_C \quad (3)$$

Исходя из этого условия, сопротивление резистора для схемы на рисунке 7а, R_N , Ом, вычисляют по формуле (4):

$$R_N \leq \frac{U_{ВН}}{\sqrt{3} \cdot I_C} \quad (4)$$

а сопротивление резистора для схемы на рисунке 7б, R_{Δ} , Ом, вычисляют по формуле (5):

$$R_{\Delta} \leq \frac{27 \cdot U_{ВН}}{\sqrt{3} \cdot K^2 \cdot I_C} \quad (5)$$

где $U_{ВН}$ – линейное напряжение стороны высшего напряжения трансформатора, В;

I_C – емкостный ток ОЗЗ, А;

K – коэффициент трансформации ТЗ, вычисляемый по формуле (6):

$$K = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} \quad (6)$$

где $U_{НН}$ – линейное напряжение стороны низшего напряжения трансформатора, В.

Расчетную мощность трансформатора заземления нейтрали и резистора R_N или R_{Δ} , S, ВА, вычисляют по формуле (7):

$$S \geq \frac{U_{ВН}^2}{3 \cdot R_N} = \frac{(3 \cdot U_{НН})^2}{R_{\Delta}} \quad (7)$$

Значение тока, протекающего через резистор в режиме ОЗЗ для схемы на рисунке 7а, I_R , А, вычисляют по формуле (8):

$$I_R = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3} \cdot R_N} \quad (8)$$

Значение тока, протекающего через резистор для схемы на рисунке 7б, I_Δ , А, вычисляют по формуле (9):

$$I_\Delta = \frac{3 \cdot U_{HH}}{R_\Delta} \quad (9)$$

Ток $I^{(1)}$ в месте ОЗЗ равен геометрической сумме емкостного тока сети и активного тока, создаваемого устройством заземления нейтрали. Значение тока $I^{(1)}$, А, вычисляют по формуле (10):

$$I^{(1)} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad (10)$$

и с учетом формулы (3):

$$I^{(1)} \geq \sqrt{2} \cdot I_C \quad (11)$$

Мощность резистора $P_{ном}$ определяется по формуле (12):

$$P_{ном} = \frac{U_\Phi^2}{R_N} \quad (12)$$

Так как в сетях 6 и 10 кВ наиболее приемлемы варианты подключения резистора к нейтрали ТЗН или специальных фильтров нулевой последовательности типа ФМЗО, то будем использовать первый вариант подключения резистора (рисунок 7а).

Сопrotивление резистора R_N , Ом, вычислим по формуле (4):

$$R_N \leq \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 9,285} = 621,8 \text{ Ом}$$

Расчетную мощность трансформатора заземления нейтрали R_N , S, ВА, вычислим по формуле (7):

$$S \geq \frac{U_{BH}^2}{3 \cdot R_N} = \frac{10000^2}{3 \cdot 621,8} = 53607,8 \text{ ВА} \quad (7)$$

Значение тока, протекающего через резистор в режиме ОЗЗ для схемы на рисунке 1.8а, I_R , А, вычисляем по формуле (8):

$$I_R = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 621,8} = 9,285 \text{ А} \quad (8)$$

Ток $I^{(1)}$ в месте ОЗЗ вычисляем по формуле (10):

$$I^{(1)} = \sqrt{9,285^2 + 9,285^2} = 13,13 \text{ А}$$

и с учетом формулы (3):

$$13,13 \geq \sqrt{2} \cdot 9,285 = 13,13 \text{ А} \quad (11)$$

Мощность резистора $P_{\text{ном}}$ определяем по формуле (12):

$$P_{\text{ном}} = \frac{10000^2 / \sqrt{3}}{621,8} = 93 \text{ кВт}$$

В качестве высокоомного резистора выбираем резистор компании ООО «Болид» РЗ – 600 – 93 – 10 – УХЛ1 или резистор компании «ЭНСОНС» РЗН ВО 10.

РЗ – А – В – С – D

РЗ – тип резистора защитного;

А – номинальное сопротивление резистора, Ом;

В – номинальная мощность резистора, кВт;

С – номинальное напряжение сети, кВ;

D — климатическое исполнение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возникновение емкостного тока в сети несёт опасность повышения напряжения относительно земли на неповреждённых фазах и может вызвать нарушение изоляции на других участках сети, кроме того вместе повреждения появляется электрическая дуга, есть опасность для людей и животных попасть под шаговое напряжение.

До сих пор самое большое число сетей среднего напряжения, эксплуатируемых с режимом изолированной нейтрали, наблюдается только на территории России. Из-за большого числа недостатков от изолированной нейтрали отказалось большинство стран мира. На сегодняшний день стоит обратить внимание на наиболее перспективные режимы – резистивно-заземленные, которые позволяют нивелировать недостатки других типов заземления, а также дополнить их положительные свойства в случае комбинированного исполнения.

По итогам расчётов емкостных токов в сети 10 кВ на ПС 110 кВ № 26 «КСК» г. Черногоorsk, выявлены значения емкостных токов нуждающихся в компенсации. Также подобрано компенсирующее оборудование для с.ш.1 РЗ – 600 – 93 – 10 – УХЛ1 и с.ш.2 АДМК–400/10. С точки зрения экономической составляющей данного мероприятия, на с.ш. 2 необходимо устанавливать ДГР. Т.к. емкостные токи слишком большие для резистивно-заземлённой нейтрали. Стоимость одного ДГР с системой автоматики более полумиллиона рублей, это не составит экономической выгоды сетевого предприятия от сохранения на некоторое время однофазных замыканий на землю. Потраченные деньги на установку и эксплуатацию ДГР, практически не окупаются. Поэтому с экономической точки зрения выгодно установить на 1 с.ш. высокоомный резистор.

Применение схем с низкоомными резисторами (с токами в несколько десятков ампер), рассчитанными на кратковременный режим работы под напряжением, предпочтительно в сетях с пониженным уровнем изоляции ли-

бо использовании высоковольтных электрических машин и при наличии у потребителей резервного питания и АВР.

В настоящее время в нашей стране требуется уделить особое внимание внесению соответствующих корректировок в регламентирующие документы, на основе которых ведется проектирование вновь строящихся объектов электроэнергетики, более конкретизировано отразить рекомендации и требования к применению различных вариаций резисторов. Следующим этапом необходимо активно организовывать модернизацию уже эксплуатируемых объектов с целью снижения рисков повреждения оборудования, повышения надежности электроснабжения, а самое главное обеспечения должной электробезопасности персонала и простых граждан.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Правила устройства электроустановок [Текст]. – 7-е изд., перераб. и доп., с изм. – Екатеринбург: Модуль, 2013. – 672 с.
2. Однофазные замыкания на землю. Компенсация емкостных токов замыкания на землю. ДГР. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://electricps.ru/ozz-dgr>
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст]. – ред. от 13.09.2018. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pue7.ru/pte/punkt.php?n=2.8.1&k=2.8.23>
4. СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35-750 кВ. Типовые решения. – Взамен документа «Схемы принципиальные электрические ОРУ от 20.12.2007 №441» Введ.20.12.2007. – ОАО «ФСК ЕЭС». – 132 с.
5. ГОСТ 2.316-2008. Единая система конструкторской документации. Правила нанесения надписей, технических требований и таблиц на графических документах. Общие положения. – Взамен ГОСТ 2.316-68; введ. 01.07.2009. – Москва.: Стандартинформ, 2009. – 12 с.
6. Научно-производственное предприятие «Брестлер». Реакторы дугогасящие масляные с конденсаторным регулированием типа АДМК. Руководство по эксплуатации БРСН.672364.039-003 РЭ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.bresler.ru/images/products/neutral-grounding-equipment/4/брсн_674863_042_рэ_адмк_2020_s.pdf
7. Высокоомные резисторы заземления нейтрали компании «ЭНСОНС» РЭН – ВО 6–35 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ensons.ru/products/rzn>
8. СТО 4.2–07–2014. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Красноярск: ИПК СФУ, 2014. – с.59

9. Выпускная квалификационная работа по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»: метод. указания / сост. Н. В. Дулевова; Сиб. федер. ун-т, ХТИ – филиал СФУ. – Абакан : Ред.изд. сектор ХТИ – филиала СФУ, 2017. – 62 с.

10. Информационно – справочное издание «Новости электротехники» журнал №6 (66) 2010 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2010/66/07.php>

11. Информационно – справочное издание «Новости электротехники» журнал №6 (102) 2016 год. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2016/102/03.php>

12. Россети Сибирь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rosseti-sib.ru/>

13. Низкоомные резисторы заземления нейтрали компании «ЭНСОНС» РЭН – НО 6-35 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ensons.ru/products/rzn-no>

14. Электротехнический справочник : в 4 т. Т. 1. Общие вопросы. Электротехнические материалы / Общ. Ред. В. Г. Герасимов, и др. ; гл. ред. И. Н. Орлов. – 10-е изд., стер. – М. : Изд. Дом МЭИ, 2007. – 440 с.

15. Передача и распределение электрической энергии / Герасименко А.А., Федин В.Т. – Изд. 2-е. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 715, [2] с. – (Высшее образование).

16. В. Н. Костин, Е. В. Распопов, Е. А. Родченко. Передача и распределение электроэнергии: Учеб. Пособие. – СПб.: СЗТУ, 2003 – 147 с.

17. Продукция компании ООО «Болид» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pnpbolid.com/produkcija/>

18. Регулирование напряжения с помощью компенсирующих устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://lektsia.com/3x1f0f.html>

19. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ. РД 34.20.179 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/250777/
20. Оптимизация режимов работы силовых трансформаторов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/science/Energetika/331745-optimizatsiya-rezhimov-raboty-silovykh-transformatorov/>
21. Оптимизация нагрузки на трансформатор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elis-group.ru/optimizacziya-nagruzki-na-transformator.html>
22. Силовые трансформаторы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://silovoytransformator.ru/razdel/110kv>
23. Регулирование напряжения трансформатора. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://electricalschool.info/elstipod/1953-regulirovanie-naprjazhenija.html>
24. Методические указания по выбору режима заземления нейтралей в сетях напряжением 6 -10 кВ предприятий ОАО «ГАЗПРОМ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docplayer.ru/40103736-Metodicheskie-ukazaniya-po-vyboru-rezhima-zazemle-niya-neytraley-v-setyah-napryazheniem-6-10-kv-predpriyatij-oao-gazprom.html>
25. Дрозд В.В. Справочник по электрическим сетям 0,4 – 35 кВ и 110 – 1150 кВ [Текст] – М. : Альвис, 2011. – 624 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение А

Таблица А1 – Выбор режима заземления нейтрали сетей 6 и 10 кВ

Значение I_c	Характеристика сети	Рекомендуемый режим заземления нейтрали	
		При действии релейной защиты на сигнал (без отключения присоединения с ОЗЗ)	При действии релейной защиты на отключение присоединения с ОЗЗ
$I_c \leq 5$ А	А РУ 6 и 10 кВ электроприводных КС; распределительные сети 6 и 10 кВ ЭСН; питающие высоковольтные сети буровых установок; сети 6 и 10 кВ электроснабжения подземных хранилищ газа	Высокоомное заземление нейтрали сети $I_R \approx I_C$. В схемах электроприводных КС обязательна гальваническая развязка вдольтрассовых ВЛ с шинами 10 кВ	Заземление нейтрали сети через резистор с током, достаточным для обеспечения селективного отключения ОЗЗ. Требуемая величина тока резистора определяется типом используемых защит от ОЗЗ. В схемах электроприводных КС обязательна гальваническая развязка вдольтрассовых ВЛ с шинами 10 кВ
$I_c \leq 5$ А	Б РУ 6 и 10 кВ газотурбинных КС; сети 6 и 10 кВ систем электроснабжения газовых промыслов и промплощадок	Высокоомное заземление нейтрали сети $I_R \approx I_C$	Заземление нейтрали сети через резистор с током, достаточным для обеспечения селективного отключения ОЗЗ. Требуемая величина тока резистора определяется типом используемых защит от ОЗЗ

Продолжение таблицы А1

Значение I_c	Характеристика сети	Рекомендуемый режим заземления нейтрали	
		При действии релейной защиты на сигнал (без отключения присоединения с ОЗЗ)	При действии релейной защиты на отключение присоединения с ОЗЗ
5 $A < I_c$ $I_c < 20$ А	А Распределительные сети 6 и 10 кВ ЭСН; сети 6 и 10 кВ с комбинированным питанием от энергосистемы ЭСН	Высокоомный резистор в нейтрали генератора блока трансформатор; высокоомный резистор в нейтрали ТЗН (для неблочных схем); точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети сподключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения)	Заземление нейтрали через резистор с током, достаточным для обеспечения селективного отключения ОЗЗ. Требуемая величина тока резистора определяется типом используемых защит ОЗЗ
5 $A < I_c$ $I_c < 20$ А	Б Сети 6 и 10 кВ питания жилых поселков и промзоны	Высокоомный резистор в нейтрали ТЗН. Точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети с подключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения)	Заземление нейтрали сети через резистор с током, достаточным для обеспечения селективного отключения ОЗЗ. Требуемая величина тока резистора определяется типом используемых защит ОЗЗ
$I_c \geq 20$ А	А Сети 6 и 10 кВ газоперерабатывающих заводов. Разветвленные сети 6 и 10 кВ с комбинированным питанием от энергосистем и электростанций СН	Точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети с подключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения) Применение разделительного трансформатора	Резистор в нейтрали сети с ограниченным временем протекания тока. Ток резистора изменяется от десятков до сотен ампер и зависит от типа защит от ОЗЗ Применение разделительного трансформатора

Окончание таблицы А1

Значение I_c		Характеристика сети	Рекомендуемый режим заземления нейтрали	
			При действии релейной защиты на сигнал (без отключения присоединения с ОЗЗ)	При действии релейной защиты на отключение присоединения с ОЗЗ
$I_c \geq 20$ А	Б	Разветвленные сети 6 и 10 кВ питания жилых поселков и промзоны	Точная компенсация тока ОЗЗ настраиваемым дугогасящим реактором в нейтрали сети с подключенным параллельно реактору высокоомным резистором (в составе реактора рекомендуется использовать устройство определения поврежденного присоединения) Применение разделительного трансформатора	Резистор в нейтрали сети с ограниченным временем протекания тока. Ток резистора изменяется от десятков до сотен ампер и зависит от типа защит от ОЗЗ Применение разделительного трансформатора

А – с вращающимися высоковольтными машинами

Б – без вращающихся машин

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт

«Электроэнергетика»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

Г.Н. Чистиков
инициалы, фамилия
« 08 » 08 2021 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

Компенсация емкостных токов замыкания на землю в сети 10 кВ ПС «КСК»
ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасиэнерго»
тема

Руководитель

Е.В. Платонова 08.09.2021, доцент, к.т.н.
подпись, дата должность, ученая степень

Е. В. Платонова
инициалы, фамилия

Выпускник

М.И. Шнякин 08.09.2021
подпись, дата

К.В. Шнякин
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

И.А. Кычакова 08.09.2021
подпись, дата

И. А. Кычакова
инициалы, фамилия

Абакан 2021