

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
институт

Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
А. С. Торопов
подпись инициалы, фамилия
«___» _____ 2023 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

Анализ возможности применения высокоомных и низкоомных резисторов
в сетях филиала 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>А. Е. Чигарских</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>И. А. Кычакова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Абакан 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
«Сибирский федеральный университет»
институт
«Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А. С. Торопов
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2023 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы**

Студенту Чигарских Арине Евгеньевне

фамилия, имя, отчество

Группа ХЭн 19-1 Направление (специальность) 13.03.02

номер

код

«Электроэнергетика и электротехника»

наименование

Тема выпускной квалификационной работы Анализ возможности применения высокоомных и низкоомных резисторов в сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго»

Утверждена приказом по университету № 286 от 17.05.2023

Руководитель ВКР Е.В. Платонова, доцент кафедры «Электроэнергетика»

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР однолинейные схемы электрических подстанций; параметры сетей ПАО «Россети-Сибирь» – «Хакасэнерго»

Перечень разделов ВКР

1. Введение
2. Особенности однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью
3. Способы заземления нейтрали в сетях с емкостными токами
4. Применение дугогасящих реакторов в распределительных сетях
5. Применение резистивного заземление нейтрали в распределительных сетях
6. Анализ емкостных токов в распределительных сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго»
7. Выбор способа заземления нейтрали на ПС 110/10 «Черногорская-Городская»
8. Выбор способа заземления нейтрали для ПС 110/10 «Западная»

Перечень графического материала

1. Емкостные токи в сетях ПАО «Россети-Сибирь» – «Хакасэнерго»
2. Компенсация емкостных токов на ПС 110/10 «Черногорская-Городская»
3. Компенсация емкостных токов на ПС 110/10 «Западная»

Руководитель ВКР

подпись

Е. В. Платонова

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

А.Е. Чигарских

инициалы и фамилия студента

«1» марта 2023 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Анализ возможности применения высокоомных и низкоомных резисторов в сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго»» содержит 73 страниц текстового документа, 22 использованных источников, 10 рисунков, 17 таблиц, 3 листа графического материала.

ЕМКОСТНОЙ ТОК, ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ, РЕЗИСТИВНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ, ДГР, ОЗЗ, РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ.

Объект исследования – емкостные токи в сетях ПАО «Россети-Сибирь» – «Хакасэнерго».

Целью выпускной квалификационной работы является анализ возможности применения высокоомных и низкоомных резисторов в сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго».

Задачи выпускной квалификационной работы:

- Анализ емкостных токов в сетях ПАО «Россети-Сибирь» – «Хакасэнерго»
- Определение мероприятий по компенсации емкостных токов на выбранных объектах
- Выбор ДГР
- Выбор низкоомного резистора
- Выбор нейтралера

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был произведен расчёт емкостных токов на ПС 110/10 «Черногорская-Городская» и ПС 110/10 «Западная», на основе полученных значений были выбраны устройства компенсации емкостных токов.

Практическая значимость исследований – данная работа может стать основой для выбора более современных устройств компенсации емкостных токов ПС.

AN ABSTRACT

The final qualifying work on the topic “Analysis of the possibility of using high-resistance and low-resistance resistors in the networks of the branch of PJSC Rosseti Siberia - Khakasenergo” contains 73 pages of a text document, 22 sources used, 10 figures, 17 tables, 3 sheets of graphic material.

CAPACITIVE CURRENT, NEUTRAL GROUNDING, RESISTIVE NEUTRAL GROUNDING, DGR, OZZ, DISTRIBUTION NETWORKS.

The object of study is capacitive currents in the networks of PJSC Rosseti-Siberia - Khakasenergo.

The purpose of the final qualification work is to analyze the possibility of using high-resistance and low-resistance resistors in the networks of the branch of PJSC Rosseti Siberia - Khakasenergo.

Tasks of the final qualifying work:

- Analysis of capacitive currents in the networks of PJSC "Rosseti-Siberia" - "Khakasenergo"
- Determination of measures to compensate for capacitive currents at selected facilities
- Choice of DGR
- Selection of a low-resistance resistor
- Neitraller selection

In the process of completing the final qualifying work, the capacitive currents were calculated at the SS 110/10 "Chernogorskaya-Gorodskaya" and SS 110/10 "Zapadnaya", based on the values obtained, capacitive current compensation devices were selected.

The practical significance of research - this work can become the basis for choosing more modern devices for compensating capacitive currents of the substation.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
1 Особенности однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью	8
2 Способы заземления нейтрали в сетях с емкостными токами.	10
3 Применение дугогасящих реакторов в распределительных сетях	14
4 Применение резистивного заземление нейтрали в распределительных сетях	23
4.1 Низкоомные резисторы	24
4.2 Высокоомные резисторы.....	26
4.3 Резистивное заземление нейтрали как способ снижения перенапряжений при ОДЗ	27
4.4 Сравнение резистивного заземления с заземлением через ДГР	28
4.5 Производители резисторов для заземления нейтрали	30
4.6 Конструктивное исполнение и основные особенности	33
4.7 Описание унифицированного блока	35
5 Анализ емкостных токов в распределительных сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго».....	37
6 Выбор способа заземления нейтрали на ПС 110/10 «Черногорская-Городская»	44
6.1 Характеристика ПС 110/10 «Черногорская-Городская».....	44
6.2 Моделирование емкостных токов на ПС 110/10 «Черногорская-Городская»	47
6.3 Расчет емкостных токов на ПС 110/10 «Черногорская-Городская»... ..	49
6.4 Выбор ДГР для ПС 110/10 «Черногорская-Городская».....	51
6.4 Выбор резистора для ПС 110/10 «Черногорская-Городская»	54
6.5 Расчет параметров нейтралера ПС 110/10 «Черногорская-Городская»	57
7 Выбор способа заземления нейтрали для ПС 110/10 «Западная»	59
7.1 Характеристика ПС 110/10 «Западная»	59
7.2 Расчет емкостных токов на ПС 110/10 «Западная»	62
7.3 Выбор ДГР для ПС 110/10 «Западная»	66
7.4 Выбор резистора для ПС 110/10 «Западная»	67
7.4 Расчет параметров нейтралера ПС 110/10 «Западная»	69
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	70
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	71

ВВЕДЕНИЕ

Работа сети в режиме изолированной или компенсированной нейтрали приводит к повышению напряжения на электрооборудовании сети в несимметричных режимах, переходных процессах при коммутации и т.п. Требования к системе защитных мероприятий определяют перенапряжения, возникающие при ОДЗ (однофазные дуговые замыкания). Количество повреждений оборудования из-за ОДЗ составляет до 80% среди всех видов аварий. Такие замыкания опасны для электрооборудования продолжительностью, площадью охвата, а так же высокими кратностями перенапряжения $(3,0..3,5)U_{фн}$. Это, безусловно, доказывает необходимость мероприятий по ограничению перенапряжений при ОДЗ.

Все применяемые способы ограничения перенапряжений основаны на использовании методов и средств, способствующих стеканию зарядов в землю, появляющихся в трехфазной сети, например, при дуговых замыканиях на землю и приводящих к появлению напряжения смещения нейтрали.

Существуют методы, которые могут предотвратить появление подобных замыканий. Для этого предусмотрено заземление нейтрали. На данный момент в сетях 6-35 кВ преобладают такие способы заземления, как изолированная нейтраль и дугогасящий реактор. Резистивное заземление встречается в разы реже, хотя является самым эффективным из всех, что доказанно мировой практикой. Заземление через резистор дает возможность всецело решить проблему дуговых перенапряжений, уменьшая повреждения изоляции электрооборудования. Помимо этого, оно повышает надежность сети и снижает аварийность при ОЗЗ.

1 Особенности однофазных замыканий на землю в сетях с изолированной нейтралью

Однофазные замыкания на землю на воздушных и кабельных линиях 6-35 кВ в сетях с изолированной нейтралью являются распространенной проблемой, с которой сталкиваются энергокомпании по всему миру. Они могут привести к серьезному повреждению электрической системы, если их своевременно не обнаружить и не устранить.

Однофазное замыкание на землю происходит, когда одна из трех фаз трехфазной системы соприкасается с землей. Когда это происходит, ток в двух других фазах остается неизменным, а ток в поврежденной фазе увеличивается.

Частой проблемой, связанной с емкостными токами, являются дуговые перенапряжения, обусловленные дуговыми замыканиями на землю. В случае, если уровни дуговых перенапряжений превышают допустимые пределы, это приводит к отказам оборудования и отключению системы.

В протяженных электрических сетях с большой емкостной проводимостью (и, соответственно большими емкостными токами) ОЗЗ при определенных условиях могут перерасти в дуговые замыкания на землю.

В большинстве случаев перенапряжения имеют кратковременный характер, поскольку возникают при быстро затухающих переходных процессах или в аварийных режимах, время которых ограничивается действием релейной защиты и системной автоматики. Различные виды перенапряжений имеют длительность от единиц микросекунд до нескольких часов. Даже самые кратковременные перенапряжения высокой кратности могут привести к пробое или перекрытию изоляции с последующим отключением поврежденного элемента сети и перерывом в электроснабжении потребителей или снижением качества электроэнергии.

Важнейшей характеристикой перенапряжений на изоляции является их кратность, т.е. отношение максимального значения напряжения к амплитуде наибольшего рабочего напряжения для данного класса напряжения: $K_{п} = \frac{U_{max}}{U_{ф}}$, о.е.[1]

Для снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе и снижения перенапряжений если дуга появится повторно, предусмотрена компенсация емкостного тока.

Существует несколько эффективных способов компенсации емкостных токов на воздушных линиях. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, и наиболее подходящий метод будет зависеть от конкретных характеристик линии передачи.[1]

2 Способы заземления нейтрали в сетях с емкостными токами

Способ заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ является достаточно важной характеристикой. Он оказывает влияние на многие факторы и определяет их: схему РЗА от замыканий на землю, ток в месте повреждения, уровень изоляции, безопасность оборудования и персонала при ОЗЗ и тд.

На данный момент выделяются следующие способы заземления нейтрали:

1. Глухозаземленная нейтраль - такой вид заземления, когда нейтраль трансформатора, подключается конкретно к заземляющему устройству. Глухозаземленным может быть также вывод источника однофазного переменного тока или полюс источника постоянного тока в двухпроводных сетях, а также средняя точка в трехпроводных сетях постоянного тока.

2. Изолированная нейтраль - нейтраль трансформатора, не присоединенная к заземляющему устройству или присоединенная к нему через высокое сопротивление приборов сигнализации, измерения, защиты и других аналогичных им устройств. При способе изолированной нейтрали нейтральная точка источника (генератора или трансформатора) не присоединена к контуру заземления. В распределительных сетях 6 - 35 кВ России обмотки питающих трансформаторов, как правило, соединяются в треугольник, поэтому нейтральная точка физически отсутствует.

Во многих странах, таких как: США, Канада, Англия, Австралия, Бельгия. Португалия, Франция и другие, отказались от режима изолированной нейтрали около 80 лет назад.

3. Заземление через ДГР – заземление нейтрали реактором, предназначенным для компенсации емкостных токов в электрических сетях с изолированной нейтралью, возникающих при однофазных замыканиях на

землю (ОЗЗ), тк имеет минимальное активное и большое реактивное сопротивление.

4. Заземление через резистор

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

На рисунке 1 представлены графические обозначения всех вышеперечисленных видов заземления.

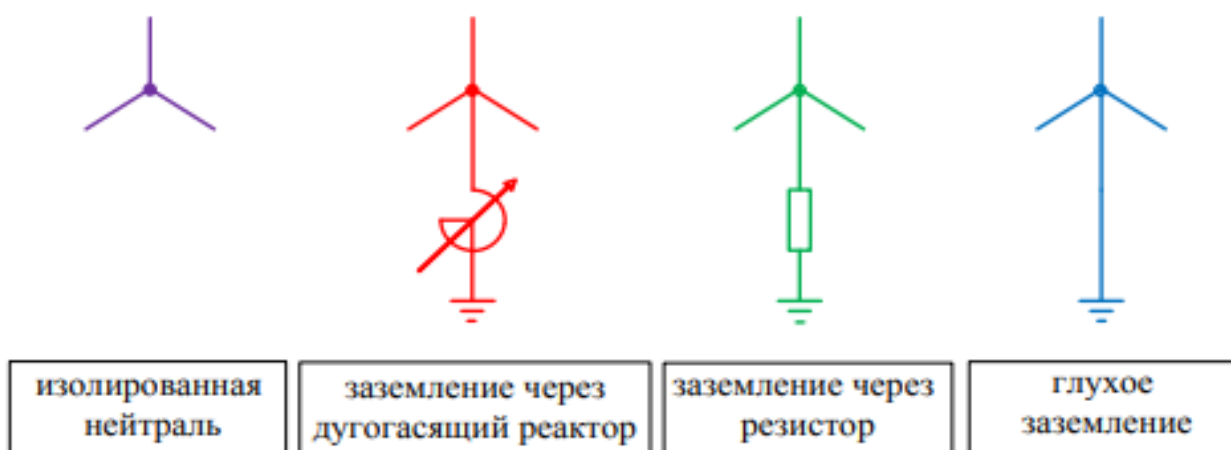


Рисунок 1-Варианты заземления нейтрали.

Кроме вышеуказанных режимов заземления нейтрали, в различных странах мира также применяется комбинирование ДГР и резистора. Например, такая комбинация встречается в воздушных сетях 20 кВ Германии, где дугогасящий реактор обеспечивает гашение кратковременных однофазных перекрытий изоляции на землю, а низкоомный резистор подключается к нейтрали сети параллельно реактору только кратковременно специальным однофазным силовым выключателем.[13]

В России, согласно п.1.2.16 последней редакции ПУЭ, введенных в действие с 1 января 2003 г., «...работа электрических сетей напряжением 3-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор». Таким образом, сейчас в сетях 6-35 кВ в России формально разрешены к применению все принятые в мировой практике способы заземления нейтрали.[2]

В распределительных сетях 6 - 35 кВ России обмотки питающих трансформаторов, как правило, соединяются в треугольник, поэтому нейтральная точка физически отсутствует.

Большинство нарушений нормальной работы сетей с изолированной нейтралью связано с повреждением изоляции относительно земли и однофазным замыканием на землю.

Такое достоинство, как отсутствие потребности отключения первого замыкания, очень неоднозначно, так как всегда есть возможность возникновения второго замыкания на другом присоединении из-за перенапряжений и отключения сразу двух кабелей, электродвигателей или воздушных линий.[12]

Недостатками режима изолированной нейтрали являются:

- возможность возникновения дуговых перенапряжений при перемежающемся характере дуги с малым током (единицы–десятки ампер) в месте однофазного замыкания на землю;
- возможность возникновения многоместных повреждений (выход из строя нескольких электродвигателей, кабелей) из-за пробоев изоляции на других присоединениях, связанных с дуговыми перенапряжениями;
- возможность длительного воздействия на изоляцию дуговых перенапряжений, что ведет к накоплению в ней дефектов и снижению срока службы;

- необходимость выполнения изоляции электрооборудования относительно земли на линейное напряжение;
- сложность обнаружения места повреждения;
- опасность. [2]

Недостатки данного режима работы весьма существенны, что доказывает необходимость перехода к другим способам заземления нейтрали.

3 Применение дугогасящих реакторов в распределительных сетях

При однофазном замыкании на землю в сети дугогасящий реактор создает в месте повреждения индуктивную составляющую тока, равную емкостной. При этом суммарный ток в месте повреждения становится равным практически нулю и первое, возникшее в сети однофазное замыкание на землю, можно не отключать. На рисунке 2 представлен дугогасящий реактор. [13]



Рисунок 2- Дугогасящий реактор

Аппарат представляет собой катушку переменной индуктивности, которая включается в цепь «нейтральная точка – земля». Принцип действия реактора основан на компенсации емкостного тока, возникающего при однофазных замыканиях на землю. На рисунке 3 представлен вариант схемы с использованием трансформатора TEGE и дугогасящего реактора ZTC. Трансформатор масляный заземляющий нулевой последовательности серии TEGE, предназначен для организации вывода нейтральной точки в сетях с изолированной нейтралью и подключения к электрической сети 6-35 кВ дугогасящих реакторов или резисторов заземления нейтрали. [24]

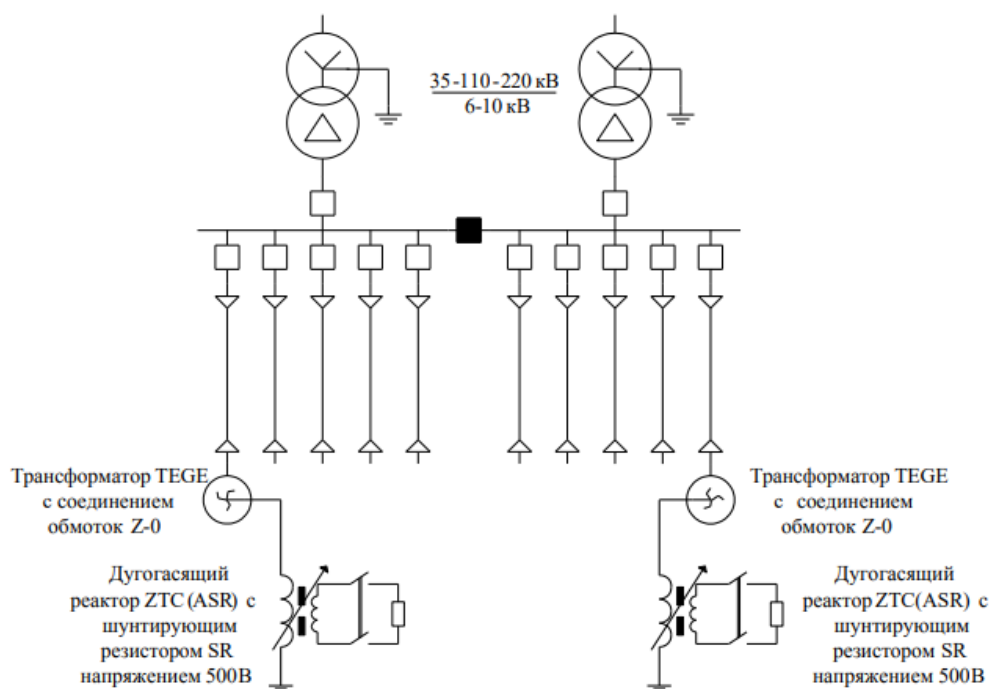


Рисунок 3 - Двухтрансформаторная подстанция с нейтралью на стороне 6-10 кВ, заземленной через дугогасящий реактор

Режим с заземлением нейтрали через дугогасящий реактор (катушку) также достаточно давно используется в России в сетях с большими емкостными токами (городских сетях, сетях промышленных предприятий). Их разделяют на несколько групп, которые почти не отличаются друг от друга: трехфазные ДГР, включаемые в нейтраль сети и пофазно

заземляющие реакторы. Чаще всего на практике используют именно ДГР включаемые в нейтраль сети.

Что касается скорости перестройки индуктивности и ДГР, то существуют определенные требования. Скорость изменения индуктивности реакторов в нормальном режиме сети не имеет принципиального значения, так как вероятность совпадения в момент обработки расстройки и замыкания на землю чрезвычайно мала. В режиме замыкания на землю влияние остаточного тока замыкания проявляется сразу же после возникновения расстройки компенсации, поэтому время отработки ДГР должно стремиться к минимуму для предотвращения возникающей при этом электрической дуги. Время отработки в этом режиме зависит от параметров сети и должно находиться в пределах 0,3-1,5 с. [14]

Конструкция обмотки и количество витков имеют решающее значение для определения импеданса реактора и величины магнитного поля, создаваемого в условиях неисправности. Полное сопротивление реактора должно быть выше, чем полное сопротивление системы, чтобы ограничить величину тока короткого замыкания и предотвратить повреждение системы.

На сегодняшний день на российском рынке электрооборудования представлены следующие типы управляемых ДГР:

1. плунжерные;
 - РЗДПОМ (производства ОАО «Электрозавод»);
 - ЗРОМ (РЗДСОМ) (производства ОАО «Электрозавод»);
 - РДМР (производства ОАО «Свердловэлектроремонт»);
 - ZTC, ASR (Чешского производства);
2. управляемые подмагничиванием;
 - РУОМ (производства ОАО «РЭТЗ Энергия»)[1]

Основные параметры данных реакторов приведены в таблице 1.

Таблица 1- Параметры ДГР

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

Дугогасящий реактор типа РЗДПОМ состоит из активной части, бака, расширителя, системы охлаждения и привода с автоматической системой управления. Активная часть, в свою очередь, состоит из обмоток и стержневого магнитопровода плунжерного типа (с регулируемым воздушным зазором). Всего реактор имеет 3 обмотки: основную силовую (обеспечивающую гашение дуги), вторичную силовую (обеспечивающую настройку реактора в резонанс с сетью и автоматический поиск повреждённого фидера) и сигнальную обмотку (необходима для управления реактором). [3]

В реакторе типа РЗДСОМ Основная и регулировочная обмотки разделены на две половины, расположенные на двухстержневом магнитопроводе. Устройство ПБН барабанного типа обеспечивает пять ступеней переключения при глубине регулирования равной двум. Управление устройством ПБН выполняется на отключенном от сети

реакторе вручную с помощью рукоятки, выведенной на крышу бака. Современным эксплуатационным требованиям реактор не соответствует.[8] Устройство двух, указанных выше, реакторов представлено на рисунке 4.

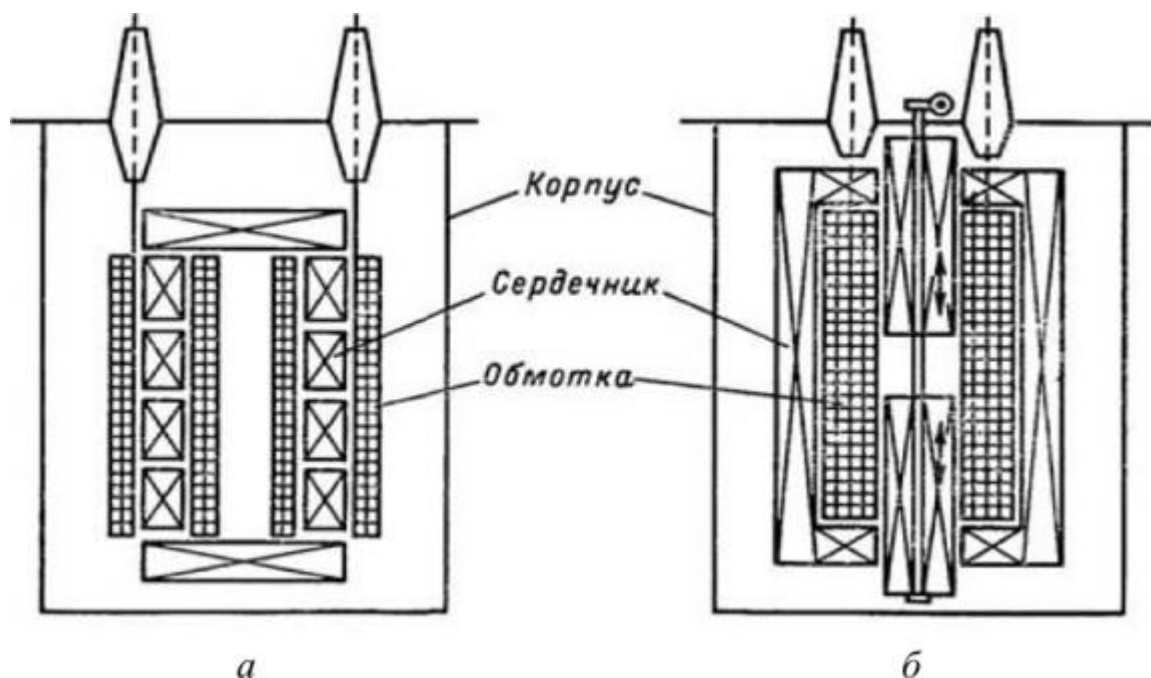


Рисунок 4 - Устройство дугогасящих реакторов а - серии РЗДСОМ; б - серии РЗДПОМ

В конструкцию дугогасящего реактора РДМР входят магнитопровод и плунжер, который состоит из двух подвижных стержней. Реактор имеет основную и две вспомогательные обмотки. Основная обмотка создает индуктивный ток, противоположный по знаку емкостному току, возникающему при однофазном замыкании на землю. Обмотка управления используется для подачи в контур нулевой последовательности сети кратковременного сигнала возбуждения нейтрали, необходимого для работы автомата управления реактора.[5]

Катушка индуктивности дугогасящий реактор ZTC ASR (рисунок 5) состоит из следующих основных элементов: активная часть — магнитная система с обмотками, и измерительным трансформатором тока; бак с

радиаторами, вентилями для залива, слива и отбора проб масла; шасси; крышка бака с приводом (редуктор и электродвигатель); проходные изоляторы; расширительный бачок с воздухоосушителем; аварийные и сигнализирующие приборы (термометр, реле Бухгольца, указатель уровня масла); шунтирующий резистор для включения во вторичную силовую обмотку; шкаф управления с автоматическими выключателями, контакторами и термостатом; механический указатель настройки компенсации. [6]

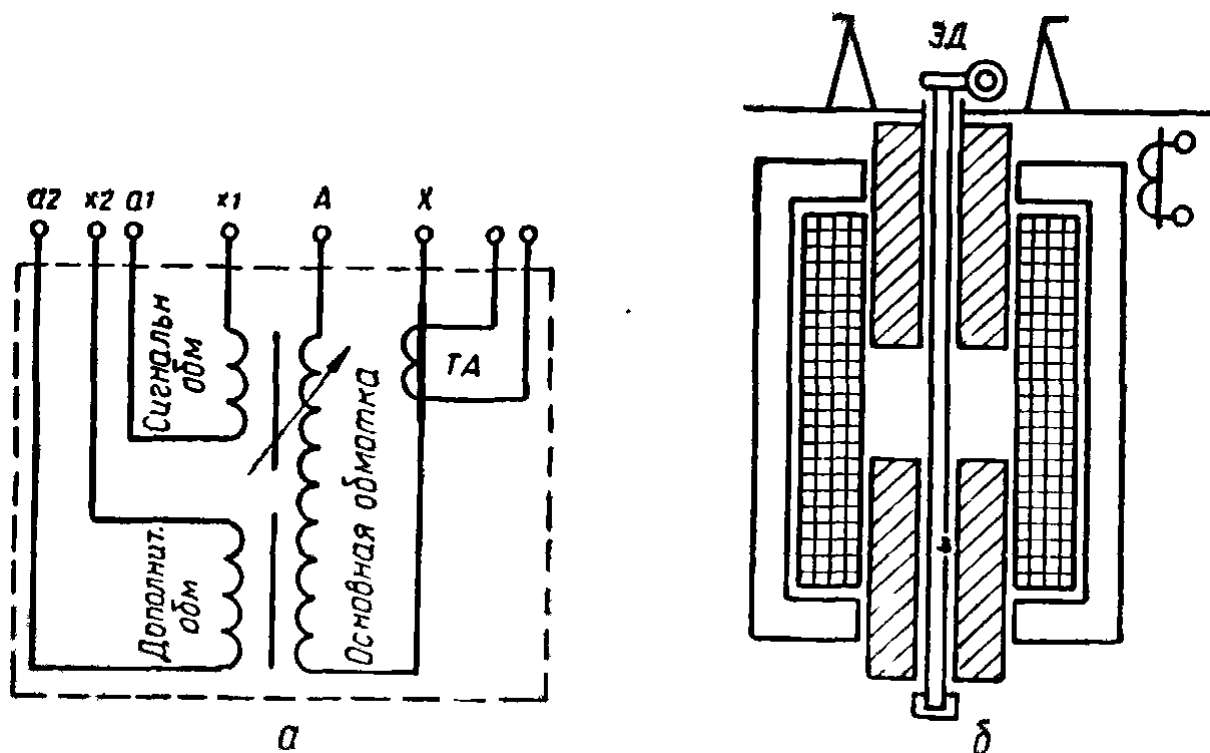


Рисунок 5 - схема (а) и стилизованный разрез (б) реактора типа ZTC

Реакторы РУОМ управляемые дугогасящие однофазные с масляным охлаждением предназначены для автоматической компенсации ёмкостных токов замыкания на землю и предотвращения переходов однофазных замыканий на землю в короткие замыкания электрической сети. Используются в сетях 6 кВ или 10 кВ с изолированной нейтралью.

Реакторы включаются между точкой заземления и выведенной нейтралью подстанционного трансформатора. В случае отсутствия трансформатора с соединением обмоток «звезда с нейтралью», реактор включается с «искусственной нейтралью», то есть нейтралью заземляющего фильтра нулевой последовательности. РУОМ состоит из электромагнитной части и тиристорного преобразователя, размещенных в общем маслonaполненном баке. Регулирование реактора (тока, мощности, индуктивности) возможно как вручную, так и автоматически при помощи системы управления реактором – САМУР (система поставляется комплектно с реактором).[7]

Но данный реактор типа РУОМ имеет ряд недостатков выявленных на практическом опыте, что доказывает необходимость отказа от применения данного реактора. К недостаткам относят следующие:

1. отсутствует возможность ручного регулирования в случае неисправности работы системы САМУР;
2. за счет медленной и неточной настройки РУОМ возникает высокая вероятность развития повреждений и аварийного отключения фидеров при дуговых ОЗЗ;
3. недопустимо высокое время выхода на режим компенсации;
4. при возникновении дуговых замыканий происходит остановка работы автоматики, что приводит к рекомпенсации ДГР тока замыкания на землю почти в 3 раза.

Автоматические регуляторы типа САМУР так же имеют недостатки. Это касается как качества настройки, так и надежности работы.

Во многих энергосистемах наблюдается отказ от ДГР с подмагничиванием и делается выбор в пользу плунжерных.

Реактор типа РДМР является аналогом ДГР типа ZTC, а также имеет массу преимуществ относительно РЗДПОМ. К преимуществам реактора типа РДМР следует отнести:

- меньшую стоимость относительно РЗДПОМ;
- большой диапазон регулирования индуктивного тока (100..6 А);
- дополнительную вторичную обмотку (аналогично реакторам ZTC);
- более линейную характеристику регулирования.[1]

Следует отметить, что применение ДГР имеет как свои достоинства, так и недостатки. Если емкостный ток ОЗЗ полностью компенсируется индуктивностью, которая включается только между нейтральной точкой какого-либо оборудования и землей, только в этом случае ДГР можно считать оправданным, но для этого надо обеспечить определенные условия:

-сеть должна быть идеально симметрична, те привести к нулевой несимметрии в нейтрали

-необходимо компенсировать не только основную, но и высших гармонических составляющих токов ОЗЗ

-индуктивность ДГР должна автоматически подстраиваться и в нормальном режиме, и в режиме ОЗЗ.

На практике данные условия обеспечиваются в основном в кабельных сетях с высоким уровнем эксплуатации. В городских сетях это встречается реже, а распределительных сетях с воздушными линиями практически отсутствует. Невыполнение данных условий в разы повышает вероятность аварийных ситуаций.

Так же стоит обратить внимание и на другие недостатки, такие как:

-аварийный режим продлевается;

-место замыкания становится еще сложнее определить, что усложняет задачу по созданию селективной защиты от ОЗЗ;

-настройка ДГР и согласование их между собой достаточно проблемно;

-безопасность эксплуатации не удовлетворяет современным требованиям

-низкая чувствительность и быстродействие неселективной релейной защиты;

-смещение нейтрали.

К основным достоинствам дугогасящих реакторов можно отнести

-возможность бесперебойной работы сети при ОЗЗ;

-если условия гашения дуги соблюдены, то появляется возможность самоустранения повреждений;

-кратность перенапряжений снижается;

-влияние на соседние установки минимально;

-минимальный остаточный ток замыкания на землю.

4 Применение резистивного заземление нейтрали в распределительных сетях

Режим заземления нейтрали через резистор используется в России не во всех сетях 6 - 35 кВ. При проектировании и эксплуатации сетей 6 - 35 кВ по большей части используется режим изолированной нейтрали (около 80 % сетей 6 - 35 кВ) и режим заземления через ДГР (около 20 % сетей 6 - 35 кВ). В России режим резистивного заземления нейтрали впервые был применен в карьерных сетях 6 кВ примерно в 1978-1983 г., а в 1987 уже в сетях собственных нужд блочных электростанций. В зарубежных странах резистивное заземление нейтрали является наиболее широко применяемым способом.

Применение резистивного заземления предполагает возможность обеспечить достаточно высокую надежность и безопасность работы электрических сетей при однофазных замыканиях на землю.

Резистивное заземление нейтрали является отличной альтернативой ДГР. Оно имеет минимум 2 преимущества, которые позволяют увеличить безопасность и надежность данной сети. К ним можно отнести:

- снижение кратности дуговых перенапряжений до $(2.0-2.5) U_{\text{фн}}$, а также ликвидацию феррорезонансных перенапряжений, что приводит к гарантированной локализации однофазных замыканий, не позволяя развиваться последним в более серьезные аварии;

- создание простой, но надежной селективной защиты от однофазных замыканий. Это уменьшает вероятность поражения при однофазных замыканиях, при этом увеличивая надежность сетей.

Резистивное заземление нейтрали приводит к упрощенному выполнению чувствительной и селективной релейной защиты от однофазных замыканий на землю, основанной на токовом принципе.

До недавнего времени режим заземления нейтрали через резистор в России применялся лишь в отдельных случаях, несмотря на его преимущества. Эти преимущества сетей определяют широкое использование этого режима в других странах.

Резистивное заземление нейтрали так же можно разделить на группы, с точки зрения создаваемого активного тока:

-низкоомное резистивное заземление - при таком виде заземления суммарный ток в месте замыкания превышает 10А.

-высокоомное резистивное заземление - при этом виде заземления ток меньше 10А, в этом случае ОЗЗ не требует отключения.

4.1 Низкоомные резисторы

Низкоомные резисторы используются в тех случаях, когда необходимо немедленно отключить ОЗЗ. Тогда ток в нейтрали должен быть необходимым для обеспечения срабатывания релейной защиты на отключение. Величина сопротивления низкоомного резистора должна быть принята, основываясь на условии обеспечения селективного срабатывания защит от ОЗЗ на защищаемом присоединении. На рисунке 6 представлена схема с использованием трансформатора TEGE и резистора NER.

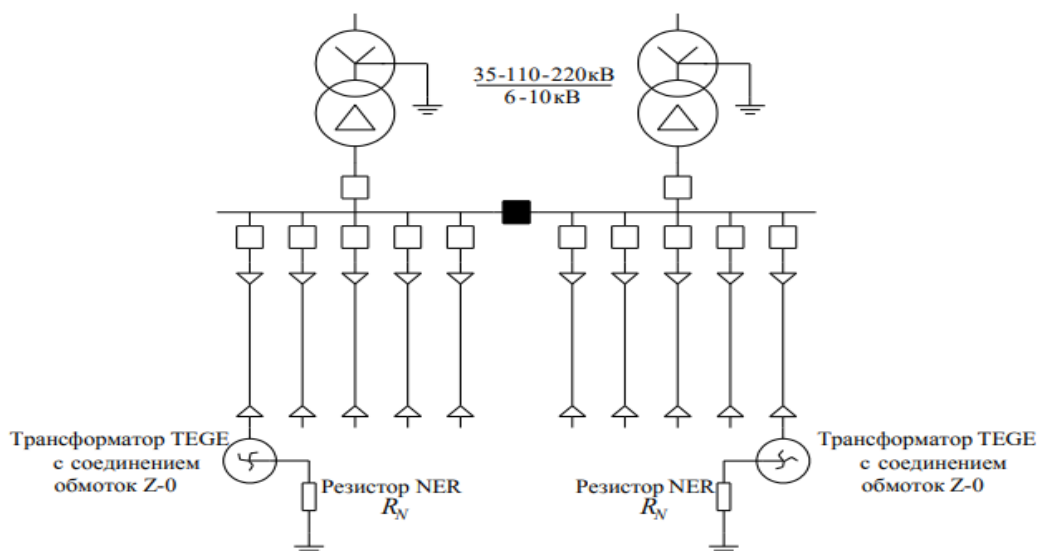


Рисунок 6 - Двухтрансформаторная подстанция с нейтралью на стороне 6-10 кВ, заземленной через низкоомный резистор

Низкоомное заземление нейтрали может выполняться в сетях с любым емкостным током, при этом активный ток IR , вырабатываемый резистором, также должен превышать емкостной ток сети. Как правило активный ток, создаваемый резистором, превышает емкостной ток сети более чем в 2 раза.

Выбор тока, создаваемого резистором при низкоомном заземлении нейтрали, обуславливается решением двух противоположных задач: повышением чувствительности защит от замыканий на землю за счет:

- повышения тока однофазного замыкания
- ограничением тока однофазного замыкания для снижения разрушения оборудования.

Обычно, ток, создаваемый резистором при низкоомном резистивном заземлении нейтрали, находится в пределах 20-2000А.

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

заземления нейтрали недостатки (увеличение тока в месте повреждения и необходимость отключения замыканий) преодолеваются за счет быстрого отключения поврежденного фидера и организации резервного питания потребителей.

4.2 Высокоомные резисторы

Высокоомное резистивное заземление нейтрали может выполняться только в сетях с емкостным током, который имеет величину до 5-7 А. При этом активный ток, создаваемый резистором, должен быть выше емкостного тока сети.

Эти резисторы имеют высокую номинальную мощность и могут выдерживать тепло, выделяемое протекающим током. Они также относительно недороги и просты в установке. Как правило, однофазное замыкание на землю при таком режиме заземления нейтрали можно не отключать, и защиты от замыканий на землю действуют на сигнал.

Данный вид заземления нейтрали целесообразно применять в случаях, когда сеть должна иметь возможность длительной работы в режиме ОЗЗ до обнаружения места ОЗЗ и устранения повреждения или имеются ограничения по величине тока повреждения. При этом ток в нейтрали должен быть такой величины, чтобы исключить появление негативных явлений, связанных с перенапряжениями и электробезопасностью, но быть достаточным для определения поврежденного присоединения и селективной работы релейной защиты на сигнал.

Известно, что высокоомное заземление нейтрали применяется для ограничения дуговых перенапряжений при замыканиях на землю в сетях с малыми токами замыкания на землю. В основном это распределительные сети 6–10 кВ общего назначения, сети 6–10 кВ собственных нужд

электростанций при действии релейной защиты от замыканий на землю (РЗЗ) на сигнал, величина сопротивления при этом выбирается из условия равенства емкостного тока замыкания на землю I_c и активного I_a , создаваемого резистором RN, подключенным к нейтрали.

Процесс компенсации включает подключение высокоомных резисторов параллельно емкостной нагрузке. Резистор действует как поглотитель тока, отводя емкостной ток от источника питания и рассеивая его в виде тепла. Сопротивление резистора должно быть тщательно выбрано, чтобы гарантировать, что он может справиться с текущим током и рассеять тепло без повреждений.

4.3 Резистивное заземление нейтрали как способ снижения перенапряжений при ОДЗ

Опыт эксплуатации и теоретические исследования доказывают, что без увеличения тока замыкания на землю, например, при дуговых замыканиях, снизить величину перенапряжений при ОДЗ, представляется возможным за счет включения высокоомного резистора в нейтраль сети.

Включение высоковольтного резистора в нейтраль сети 6-35 кВ дает возможность устранить недостатки работы сети с изолированной или компенсированной нейтралью и позволяет:

практически полностью исключить переходы ОЗЗ в двойные/многочестные короткие замыкания;

ограничить перенапряжения при ОДЗ, что приводит к уменьшению числа перекрытий и снижению числа фиксируемых замыканий;

обеспечить селективность определения поврежденного фидера доступными вариантами релейной защиты на токовом или фазовом принципе;

исключить опасные феррорезонансные явления, вызванные насыщением магнитопроводов ТН;

снизить напряжение смещения нейтрали в сети с резонансной настройкой ДГР до нормируемой величины.

Уменьшение номинала резистора приводит к увеличению тока ОЗЗ, что с одной стороны, обеспечивает быстрый разряд емкости фаз и снижению напряжения на нейтрали, а с другой, повышение количества энергии, рассеиваемой резистором. В зависимости от параметров сети есть такое значение сопротивления, которое обеспечивает эффективное снижение напряжения на нейтрали при наименьшем выделении энергии в резисторе.[1]

4.4 Сравнение резистивного заземления с заземлением через ДГР

ДГР и резисторы были сравнены по каждому из 4х пунктов и были выявлены достоинства и недостатки.

1. Надежность электроснабжения потребителей.

В случае использования резистивного заземления практически полностью исключается возможность перехода однофазного замыкания в многофазное. Быстрое отключение поврежденного замыканием элемента. Но в случае с ВЛ обнаружить место КЗ не является возможным.

С ДГР отсутствует необходимость в немедленном отключении первого ОЗЗ. При максимальной компенсации сети, снижение тока ОЗЗ улучшает условия электробезопасности в месте замыкания. Так же стоит выделить существенные недостатки данного метода: в большинстве случаев ОЗЗ переходят в двух- трехфазные и линия отключается, при длительном не отключении ОЗЗ в сетях выполненных однофазным кабелем возникает повышенная опасность и тд.

2. РЗА

Ток сопротивления резистора выбираются так, ток однофазного короткого замыкания в самой дальней точке должен превышать 800 А, соответственно представляется возможность простого выполнения селективной и чувствительной релейной защиты.

С ДГР ситуация является противоположной, обеспечить правильную работу релейной защиты от ОЗЗ имеет некоторые сложности, тк ток поврежденного присоединения очень мал.

3. Уровень перенапряжений и требования к изоляции электрооборудования

При резистивном заземлении перенапряжения возникающие при дуговых замыканиях на землю могут достигать 1.9-2.2 U_{ϕ} , а длительность их так же ограничена временем работы защиты.

Перенапряжения, которые возникают при дуговых замыканиях на землю могут достигать 3.2 U_{ϕ} . Это приводит к таким последствиям:

- длительное воздействие на изоляцию дуговых перенапряжений, что приводит к уменьшению срока службы;
- возникновение множественных повреждений из-за пробоев изоляции;
- потребность в выполнении изоляции электрооборудования на линейное напряжение относительно земли.

4. Стоимость строительства.

При выборе ДГР необходимо применять кабели с увеличенным сечением кабеля. Повышенные требования к изоляции электрооборудования. Высокая стоимость систем автоматической подстройки.

С резистивным заземлением применяется кабель среднего напряжения и стандартного сечения экрана кабеля, а также нет требований к усиленной изоляции оборудования. Стоимость самого резистора в разы ниже ДГР. [12]

Исходя из вышеуказанной информации делаем вывод, что резистивное заземление является более эффективным и надежным методом компенсации.

4.5 Производители резисторов для заземления нейтрали

Резисторы для заземления нейтрали выпускаются более чем на пятидесяти предприятиях на различных континентах мира: Индия (NATIONAL RESTSTORS ONIES), США (JENKINS), Италия (TELEMA), Япония (MILUOKI RESISTOR), Канада (AVTRON, ICP), Турция (HILKAR) и т.д

Для изготовления собственно резистивных элементов используются металлические сплавы: нихром, константан, чугун, алюмохромистая сталь и т.д. Конструктивно резисторы для заземления нейтрали изготавливаются в виде шкафа со степенью защиты IP 23. Температура на поверхности резистивного элемента согласно стандарта IEEE-32 1972 - 610 °С, а при импульсном нагружении на 10, 30 или 60 секунд – 760 °С. Некоторые технические характеристики резисторов ряда производителей приведены в таблице 2. Типовая конструкция резистора для заземления нейтрали на примере резистора NGR (США, Post Glover) приведены на рисунке 7. [16]

Таблица 2 – Технические характеристики резисторов некоторых производителей.

Наименование предприятия	Страна	Тип резистора	Номинальное напряжение, кВ	Ток резистора, А
1	2	3	4	5
AVTRON	США	ANG	0,48-13,8	5-1200

1	2	3	4	5
JOVYATLAS	Германия	EW	12-24	50-2000
Metal deploy resistor	Франция		0,38-500	5-5000
RARA electronic corporation	Южная Корея		0,2-72	50-500
EGE	Чехия	NER	0,38-35	2-400

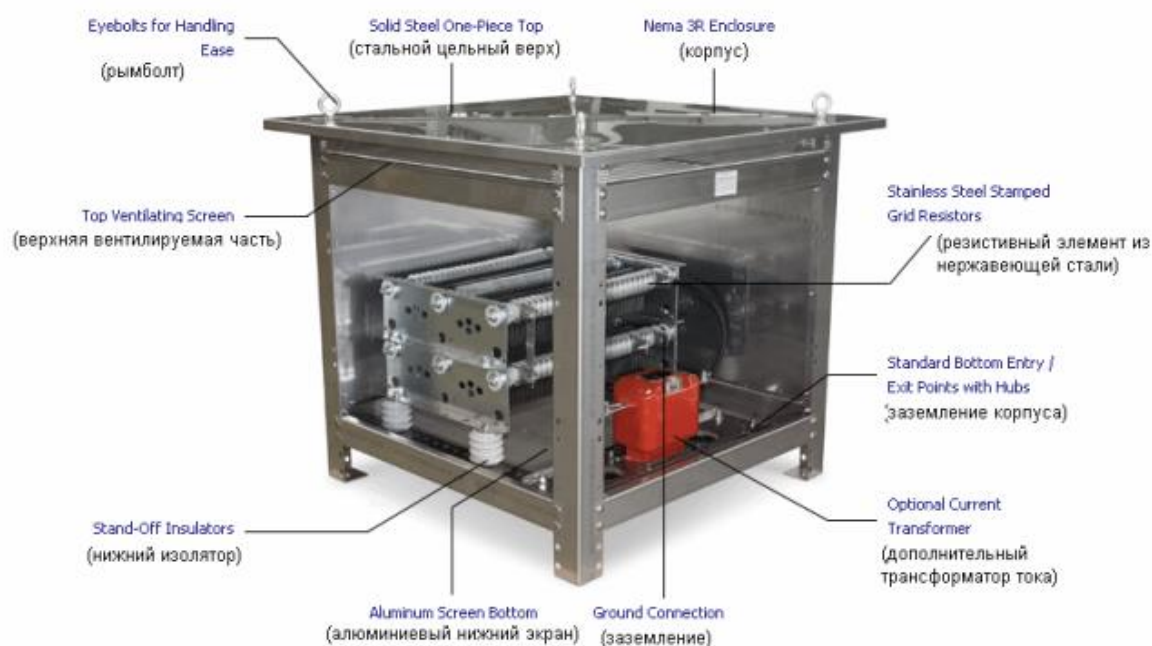


Рисунок 7 - Типовая конструкция резистора NGR (США)

Из Российских производителей можно выделить данные компании:

1. Компания “ЭНСОНС”

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

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.[9]

2. Болид

Компания "Болид" – общество с ограниченной ответственностью было создано в 1991 году на базе коллектива лаборатории композиционных резистивных материалов Сибирского НИИ Энергетики. 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.

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 3000 резисторов на номинальное напряжение сети 3, 6, 10, 20, 35 кВ.[17]

Резисторы серии РЗ и РЗ1 производства ООО «Болид» в 2022 году успешно прошли аттестацию ПАО «Россети» и рекомендованы для применения на их объектах.

Ниже представлен резистор производства ООО «ПНП Болид»- высоковольтный резистор для заземления нейтрали сетей 6-35 кВ.

Высоковольтный резистор типа РЗ предназначен для защиты сетевого оборудования от дуговых и феррорезонансных перенапряжений путем частичного заземления нейтрали в сети с номинальным напряжением 3, 6, 10, 35 кВ. Резисторы защитные типа РЗ для сетей напряжением 3-10 кВ выпускаются по ТУ 3414-006-11840528-97. Резистор защитный типа РЗ для сети 35 кВ выпускается по ТУ 3414-007-50389285-00. [17]

4.6 Конструктивное исполнение и основные особенности

Основой резистора являются элементы резистора защитного ЭРЗ, изготавливаемые в соответствии с ТУ 3414-005-11840528-97 «Элементы резистора защитного». ЭРЗ представляет собой соединенные в электрическую цепь элементы ЭНГФ из материала «ЭКОМ», помещенные в металлический корпус с диэлектрической теплопроводной прокладкой между корпусом и ЭНГФ. Металлический герметичный корпус снабжен устройством для выравнивания давления внутри тела резистивного элемента. ЭРЗ соединяют последовательно, ориентируют вертикально и

закрепляют на раме. Величина зазора между ЭРЗ определяется номинальным напряжением сети, в которой устанавливается резистор, и теплоотдачей в стационарном режиме.

Материал «ЭКОМ» – это электропроводный композиционный материал многофункционального назначения. Композит «ЭКОМ» разработан на основе, так называемой, химически связанной керамики с электропроводными добавками.

В материале «ЭКОМ» ток протекает по всему объему материала. Это приводит к высокой надежности, т.к., в отличие от проволочных нагревательных элементов, проводящие цепочки многократно дублируются по всему объему.

Основными компонентами являются графит, корунд, окись железа, ортофосфорная кислота. Каждый из компонентов обеспечивает определённую функцию. Графит обеспечивает электропроводность материала, корунд – теплоотвод, взаимодействие окиси железа с кислотой дает фосфат железа, обеспечивающий механическую прочность.

Композиционный материал «ЭКОМ» имеет отрицательный температурный коэффициент сопротивления (ТКС). При последовательном соединении элементов отрицательный ТКС позволяет выравнивать выделяемые мощности в различных резистивных элементах.

На основе этого материала разработана конструкция РЗ для заземления нейтрали сети (ТУ 3414-001-73132086-2010 «Резистор защитный типа РЗ») и налажен их серийный выпуск.

Резистор состоит из отдельных ЭРЗ, каждый из которых представляет собой резистивную пластину или несколько пластин, помещенных в кожух с диэлектрической теплопроводной прокладкой между кожухом и пластиной. Элементы соединяют последовательно, ориентируют вертикально и закрепляют на раме. Величина зазора определяется уровнем допустимого пробивного напряжения и теплоотводом.

Пластины изолированы от металлического корпуса изолирующими прокладками. Металлический герметичный корпус имеет устройство для выравнивания давления внутри тела резистивного элемента.[1]

Резистор серии РЗ конструктивно выполняется из одного или нескольких унифицированных резистивных блоков (рисунок 8).

4.7 Описание унифицированного блока

Основание (1) установлено на 4-х опорных стойках (2). На основании установлены опорные изоляторы (3). Закрепленные на изоляторах изоляционные пластины (4) служат опорой для элементов резистора защитного (ЭРЗ) (5). В жестко закрепленных на изоляторах вертикальных стойках (6) установлена регулируемая по высоте изоляционная пластина (7), с помощью которой производится фиксация сверху элементов резистора ЭРЗ (рисунок 8). [15]

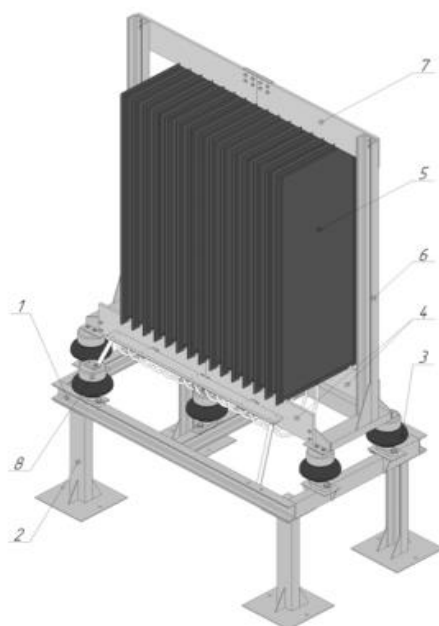


Рисунок 8 – Резистор серии РЗ

Конструктивное выполнение резистора в виде набора вертикально ориентированных отдельных пластин создает хороший теплоотвод от пластин в воздух за счет естественной конвекции. Это дает возможность стационарной работы резистора в неполнофазном режиме. В соответствии с правилами эксплуатации электроустановок неполнофазный режим может продолжаться до 6 часов без отключения потребителей и резистора.

Выполнение резистора из набора отдельных пластинчатых элементов дает возможность легко и быстро подобрать необходимое количество составляющих элементов для обеспечения нужного сопротивления и мощности в сетях от 3 до 35 кВ.

Пожарная безопасность резистора обеспечивается исключением применения изделий, способных выделять токсичные продукты горения в количестве, представляющее опасность для жизни и здоровья людей.

Установка РЗ позволяет уменьшить перенапряжения, возникающие при ОДЗ, увеличить срок службы и повысить надёжность работы электрооборудования. Разработанный тип резисторов РЗ принципиально отличается от любых других резисторов (бетэловых, проволочных) тем, что он способен выдерживать нагрузки в течение времени, достаточного для обнаружения персоналом места замыкания на «землю» и принятия адекватного решения в сложившейся аварийной обстановке. [1]

5 Анализ емкостных токов в распределительных сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго»

Анализ проводится на основе таблицы 3 с расчетными значениями емкостных токов замыкания на землю в сетях 6-35 кВ за 2017 г. На данный момент компенсация емкостных токов посредством ДГР выполняется только на пяти подстанциях.

Таблица 3 – Расчетные значения емкостных токов сетей ПАО «Россети-Сибирь» – «Хакасэнерго»

№П П	Подстанция	Секция	Емкостной ток	Устройство компенсации	Состояние	Ток регулирования	Ток после компенсации	Заключение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Черногорский РЭС								
№1	Рассвет	1сек. 10 кВ	9,300	нет				Не требуется
	Рассвет	2сек. 10 кВ	10,700	нет				Не требуется
	Рассвет	1сек. 6 кВ	0,000	нет				Не требуется
	Рассвет	2сек. 6 кВ	0,001	нет				Не требуется
	Рассвет	3сек. 6 кВ	4,500	нет				Не требуется
	Рассвет	4сек. 6 кВ	4,460	нет				Не требуется
№2	Гидролизная	1сек. 6 кВ	1,360	нет				Не требуется
	Гидролизная	2сек. 6 кВ	9,920	нет				Не требуется
	Гидролизная	3сек. 6 кВ	5,780	нет				Не требуется
	Гидролизная	4сек. 6 кВ	2,240	нет				Не требуется

Продолжение таблицы 3

№П П	Подстанция	Секция	Емкостной ток	Устройство компенсации	Состояние	Ток регулирования	Ток после компенсации	Заключение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Сибирь	2сек. 10 кВ	5,100	нет				Не требуется
№4	Черногорская- Городская	1сек. 10 кВ	23,750	нет				Требуется компенсация
	Черногорская- Городская	2сек. 10 кВ	0,480	нет				Не требуется
	Черногорская- Городская	3сек. 10 кВ	28,250	нет				Требуется компенсация
	Черногорская- Городская	4сек. 10 кВ	38,600	нет				Требуется компенсация
№5	Насосная	1сек. 10 кВ	8,800	нет				Не требуется
	Насосная	2сек. 10 кВ	4,000	нет				Не требуется
№6	КСК	1сек. 10 кВ	9,200	нет				Не требуется
	КСК	2сек. 10 кВ	48,090	нет				Требуется компенсация
№7	Кирзавод- Новая	1сек. 10 кВ	0,200	нет				Не требуется
	Кирзавод- Новая	2сек. 10 кВ	0,900	нет				Не требуется
Усть-Абаканский РЭС								
№1	Юго-Западная	1сек. 10 кВ	37,920	РЗДПО М- 480/10	отключен	автоматическое		Не требуется
	Юго-Западная	2сек. 10 кВ	27,830	РЗДПО М- 480/10	отключен	автоматическое		Не требуется
№2	Райково	2сек. 10 кВ	1,900	нет				Не требуется
№3	Ташеба- Сельская	1сек. 10 кВ	2,700	нет				Не требуется
	Ташеба- Сельская	2сек. 10 кВ	1,010	нет				Не требуется
№4	Калининская	1сек. 10 кВ	37,500	РЗДСО М- 380/10	включен	37	0	Не требуется

Продолжение таблицы 3

№П П	Подстанция	Секция	Емкостной ток	Устройство компенсации	Состояние	Ток регулирования	Ток после компенсации	Заключение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Калининская	3сек. 10 кВ	12,150	РДМР-485/10	отключен	автоматическое		Не требуется
	Калининская	4сек. 10 кВ	2,700	РДМР-485/10	отключен	автоматическое		Не требуется
№5	Южная	1сек. 10 кВ	18,500	РЗДСО М-380/10	отключен	18,5		Не требуется
	Южная	2сек. 10 кВ	17,300	РЗДСО М-380/10	отключен	15,5		Не требуется
	Южная	3сек. 10 кВ	44,770	РЗДСО М-380/10	включен	12,5	-32,7	Не требуется
	Южная	4сек. 10 кВ	15,800	РЗДСО М-380/10	отключен	21,5		Не требуется
№6	Элеваторная	1сек. 10 кВ	16,040	нет				Не требуется
	Элеваторная	2сек. 10 кВ	8,810	нет				Не требуется
№7	Западная	1сек. 10 кВ	27,240	РЗДПО М-480/10	включен	автоматическое		Не требуется
	Западная	2сек. 10 кВ	24,230	РЗДСО М-380/10	отключен	49		Не требуется
	Западная	3сек. 10 кВ	30,870	РЗДСО М-380/10	отключен	31		Не требуется
	Западная	4сек. 10 кВ	38,150	ЗРОМ – 380/10	отключен	46,1		Не требуется
№8	Северная	1сек. 10 кВ	25,590	РЗДСО М-380/10	включен	37	12,59	Не требуется
	Северная	2сек. 10 кВ	51,680	РЗДСО М-380/10	отключен	37		Не требуется
Ширинский РЭС								
№1	Шира	1сек. 10 кВ	4,300	нет				Не требуется
	Шира	2сек. 10 кВ	5,700	нет				Не требуется
№2	Беренжак	1сек. 10 кВ	0,020	нет				Не требуется
Боградский РЭС								
№1	Боград	1сек. 10 кВ	1,200	нет				Не требуется
	Боград	2сек. 10 кВ	1,200	нет				Не требуется

Продолжение таблицы 3

№П П	Подстанция	Секция	Емкостной ток	Устройство компенсации	Состояние	Ток регулирования	Ток после компенсации	Заключение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Знаменка	2сек. 10 кВ	0,600	нет				Не требуется
№3	Сарагаш	1сек. 10 кВ	0,800	нет				Не требуется
	Сарагаш	2сек. 10 кВ	0,300	нет				Не требуется
№4	Первомайская	1	2,300	нет				Не требуется
Орджоникидзевский РЭС								
№1	Орджоникидзе	1сек. 10 кВ	0,100	нет				Не требуется
	Орджоникидзе	2сек. 10 кВ	0,100	нет				Не требуется
№2	Копьево	1сек. 10 кВ	3,500	нет				Не требуется
	Копьево	2сек. 10 кВ	1,200	нет				Не требуется
Белоярский РЭС								
№1	Лукьяновка	1сек. 10 кВ	2,322	нет				Не требуется
	Лукьяновка	2сек. 10 кВ	4,674	нет				Не требуется
№2	Очуры	1сек. 10 кВ	1,918	нет				Не требуется
	Очуры	2сек. 10 кВ	1,935	нет				Не требуется
№3	Подсинее	1сек. 10 кВ	1,486	нет				Не требуется
	Подсинее	2сек. 10 кВ	2,450	нет				Не требуется
Саяногорский РЭС								
№1	ГПП-3 "КСРЗ"	1сек. 10 кВ	3,900	нет				Не требуется
	ГПП-3 "КСРЗ"	2сек. 10 кВ	1,500	нет				Не требуется
	ГПП-3 "КСРЗ"	3сек. 10 кВ	2,300	нет				Не требуется
	ГПП-3 "КСРЗ"	4сек. 10 кВ	1,400	нет				Не требуется
№2	ГПП-4	1сек. 10 кВ	17,900	нет				Не требуется
	ГПП-4	2сек. 10 кВ	33,800	нет				Требуется
№3	Карак	1сек. 6 кВ	0,100	нет				Не требуется
	Карак	2сек. 6 кВ	0,050	нет				Не требуется
№4	Стройбаза	1сек. 10 кВ	16,050	нет	в работе			Не требуется

Окончание таблицы 3

№П П	Подстанция	Секция	Емкостной ток	Устройство компенсации	Состояние	Ток регулирования	Ток после компенсации	Заключение
1	2	3	4	5	6	7	8	9
№5	ГПП-2	1сек. 6 кВ	4,200	нет				Не требуется
	ГПП-2	2сек. 6 кВ	3,400	нет				Не требуется
Бейский РЭС								
№1	Бея	1сек. 10 кВ	1,100	нет				Не требуется
№2	Бея	2сек. 10 кВ	1,600	нет				Не требуется

На ПС 110 кВ «Юго-Западная» на 1 секции шин 10 кВ и 2 секции шин 10 кВ установлены ДГР типа РЗДПОМ-480/10 с автоматическим током регулирования на устройстве компенсации. Реакторы не введены в работу.

ПС 110/10 кВ «Калининская» – на 1 секции шин 10 кВ и 2 секции шин 10 кВ установлены реакторы РЗДСОМ-380/10, а на 3 секции шин 10 кВ и 4 секции шин 10 кВ – РДМР-485/10 с автоматическим током регулирования на устройстве компенсации. Ни на одной секции реактор не введен в работу, но это необходимо.

На ПС 110/10кВ «Западная» на 1 секции шин – РЗДПОМ-480/10, на 2 и 3 секциях шин-РЗДСОМ-380/10 и на 4 секции шин – ЗРОМ – 380/10. Также не в работе.

На ПС 110/10 кВ «Южная» и ПС 110/10 кВ Северная на каждой секции установлен реактор типа РЗДСОМ-380/10.

На большинстве подстанций дугогасящий реактор не справляется со своей задачей и токи после компенсации превышают допустимые 20 А. Так например на ПС 110/10 кВ «Южная» на 3 секции шин на момент расчетов емкостной ток составлял 44,770 А, в то время ток регулирования на ДГР равен 12,5 А. Помимо прочего по заключению службы диагностики

некоторые ДГР не соответствуют РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования». На ПС 110/10 кВ «Юго-Западная» на 2 секции шин, ПС 110/10 кВ «Западная» на 2 секции шин и ПС 110/10 кВ «Северная» на 2 секции шин требуется восстановление кабельной линии 10 кВ.

На ПС 110/10 кВ «Стройбаза» установлен ФМЗО-200/11. ФМЗО (фильтр нулевой последовательности) предназначен для выделения тока, который возникает при нарушении симметрии между фазами электросети. При нормальном режиме работы его значение равняется нулю. Появление тока нулевой последовательности говорит о замыкании одной из фаз на землю. Через ФМЗО подключают дугогасящие реакторы с масляным охлаждением и резисторы марки РЗН. Специальные нейтралеобразующие устройства типа ФМЗО предназначены для создания нейтральной точки сети с целью подключения ДГР и резисторов или силовые трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда выведенной нейтралью» и «треугольник». При отсутствии необходимости питания нагрузок от низкой стороны заземляющих трансформаторов для подключения ДГР, резисторов предпочтительнее использовать ФМЗО, т.к. по сравнению с трансформаторами одинаковой мощности они обладают улучшенными массогабаритными показателями и меньшими потерями холостого хода.

Также есть подстанции, где емкостные токи превышают допустимые, соответственно требуется компенсация, но компенсирующие устройства не установлены. К ним относятся ПС 110/10 кВ «Черногорская-Городская», ПС 110/10 кВ «КСК» и ПС 110/10 кВ «ГПП-4».

На ПС 110/10 кВ «Черногорская-Городская» необходима установка компенсирующих устройств на 1 секции шин, где величина емкостного ток равен 23,750 А, на 3 секции шин – 28,250 А и на 4 секции шин – 38,600 А. ПС 110/10 «КСК» только на 2 секции шин. емкостной ток превышает

допустимый (ток, не требующий компенсации) и составляет 48,090 А. Также на 2 секции шин ПС 110/10 «ГПП-4» – 33,800 А.

В результате анализа распределительных сетей филиала ПАО «Россети Сибирь» – «Хакасэнерго» можно сделать вывод, что на данный момент в сетях 6-35 кВ очень слабое оснащение компенсирующими устройствами. ДГР установлены всего на пяти подстанциях и не везде введены в работу, даже там, где это необходимо. Реакторы типа РДМР, которые являются лучшими из выпускаемых в России по величине кратности регулирования индуктивного тока, используются на единственной ПС – ПС 110/10 «Калининская» на 3 секции шин и 4 секции шин. Резистивный и комбинированный типы заземления нейтрали не применяются.

6 Выбор способа заземления нейтрали на ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

6.1 Характеристика ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

ПС 110/10 «Черногорская-Городская» принадлежит филиалу ПАО «Россети-Сибирь» – «Хакасэнерго». Однолинейная схема данной подстанции представлена на рисунке 9.

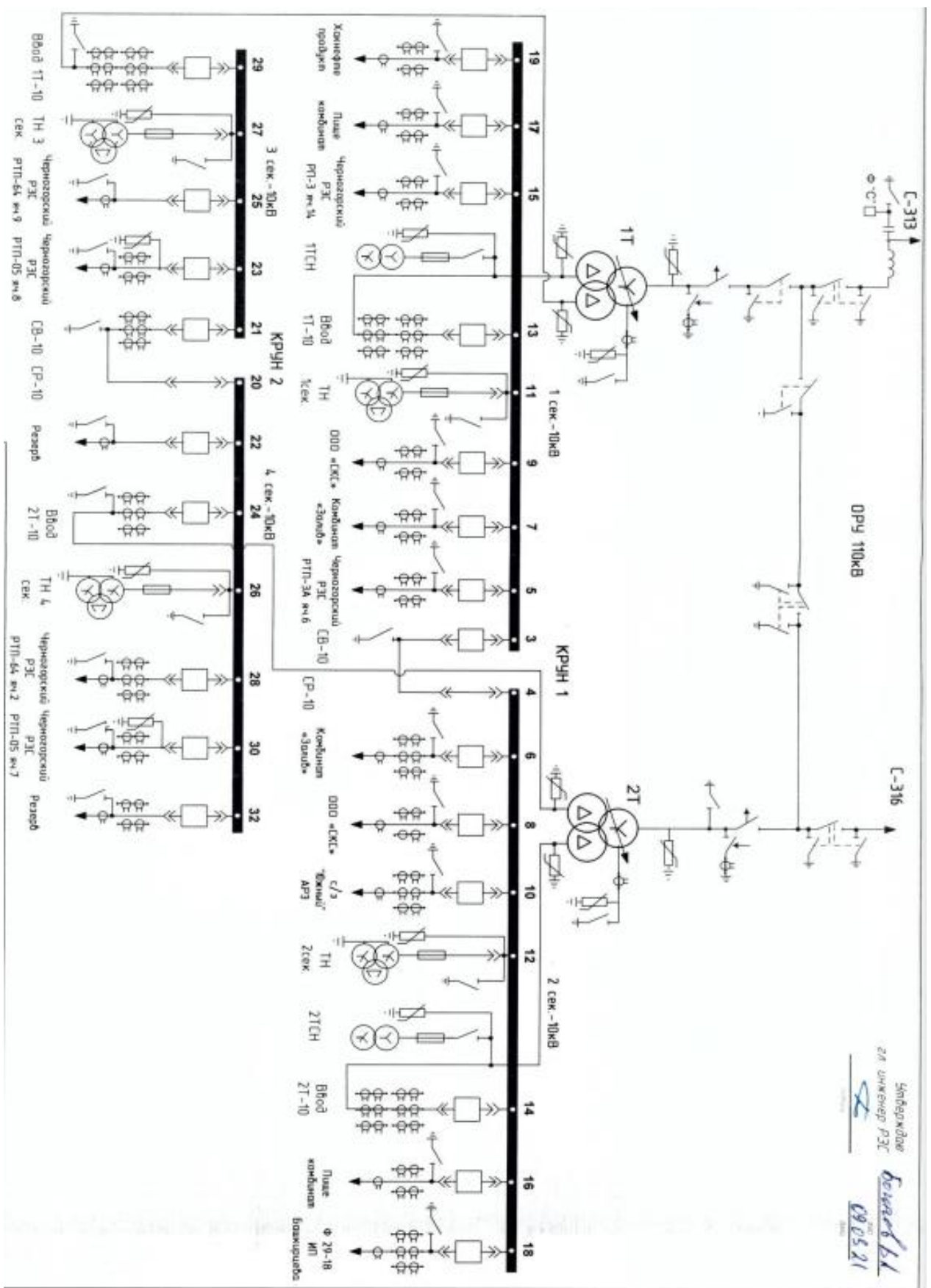


Рисунок 9 – Однолинейная схема ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

На подстанции установлено 2 трехфазных силовых трансформатора типа ТРДН-25000/110 мощность 25000 кВА. 1Т питает 1 и 3 секции шин, а 2Т – 2 и 4 секции.

Т - трехфазный;

Р - расщепление обмотки низшего напряжения;

Д - охлаждение с принудительной циркуляцией воздуха и естественной циркуляцией масла;

Н - регулирование напряжения под нагрузкой.

Трансформатор предназначен для работы в электрических сетях общего назначения 110 кВ, рассчитан на работу в районах с умеренным климатом на открытом воздухе. Условия эксплуатации: высота установки над уровнем моря – не более 1000 м; температура окружающего воздуха при эксплуатации в рабочем состоянии от минус 45 °С до плюс 40 °С.[22] Характеристика трансформатора приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристика трансформатора ТРДН-25000/110

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, кВ		Потери, кВт		УКЗ, %	IХХ, %
	УВН, кВ	УНН, кВ	РХХ, кВт	РКЗ, кВт		
ТРДН-25000/110	110	11	17	120	10,5	0,002

От 1 секции шин питание получают такие присоединения, как: 19 фидер Хакнефтепродукт, 17 фидер ПищекOMBинат, 15 фидер Черногорский РЭС РП-3, 9 фидер ООО «СКС», 7 фидер Комбинат «Залив», 5 фидер РТП-3А (РТП-распределительная трансформаторная подстанция), а 13 фидер предусмотрен для ввода трансформатора 1Т. В свою очередь от РТП-3А получают питание несколько трансформаторных подстанций.

2 секция шин питает:

6 фидер Комбинат «Залив», 8 фидер ООО «СКС», 10 фидер с/з «Южный», 16 фидер Пищеккомбинат, 18 фидер ИП Башкирцев, 14 фидер для ввода 2Т.

3 секция шин:

25 фидер РТП-64, 23 фидер РТП-05 и 27 фидер для ввода трансформатора 1Т. От РТП-64 и РТП-05 также питает ряд подстанций.

4 секция:

28 фидер РТП-64, 30 фидер РТП-05, 32 и 22 фидеры предусмотрены для резерва, 24 для ввода 2Т.

На каждой секции шин установлено по 1 трансформатору напряжения: на 1 и 2 секции шин ТН типа НТМИ-10, на 3 и 4 типа НАМИ-10.

6.2 Моделирование емкостных токов на ПС 110/10

«Черногорская-Городская»

Моделирование емкостных токов было проведено на ПС «Черногорская-Городская» в 2010 г. и отражено в научно-исследовательском отчете. [1]

Был произведен расчет емкостных токов всех присоединений, согласно указанным маркам, сечениям и длинам кабельных и воздушных линий 10 кВ. В таблице 5 сведены суммарные значения емкостного тока по секциям шин, где при раздельной работе на 1 секции шин $I_c = 44,2$ А, а на 2 секции шин $I_c = 10,2$ А.

Таблица 5 – Суммарные значения емкостного тока сети 10кВ ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

$I_{c.1СШ}, A$	$I_{c.2СШ}, A$	$I_{c.СУММ}, A$
10,177	44,166	54,343

Согласно п.5.11.8 Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ в сети 10 кВ при емкостном токе выше 20 А, должны быть применены меры компенсации емкостного тока замыкания на «землю» ДГР (таблица 6). На основе полученных расчетных значений емкостного тока ОЗЗ в сети 1 секции шин ПС 110/10 «Черногорская-Городская» необходима установка ДГР.

Таблица 6 – Значения токов требующих компенсацию

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

Так же, в данном исследовании было проведено математическое моделирование переходных процессов для различных расчетных режимов, которое наглядно показало, что второе и последующие зажигания дуги происходят при ненулевом значении напряжения на нейтрали. В результате перенапряжение на «здоровых» фазах принимают значение $3,4 U_{\phi}$.

Т.к. резистивное заземление позволяет устранить недостатки работы сети, по этой причине были проведены расчеты для выявления воздействия РЗ на величина напряжения при ОДЗ и по определению номинала резистора обеспечивающий оптимальный уровень ограничения $(2,4..2,5)U_{\phi}$.

Расчеты показали, что оптимальный уровень ограничения перенапряжения достигается с помощью резистора номиналом 700 Ом. Это доказало, что в сети 10кВ ПС 110/10 «Черногорская-Городская» необходимо установить постоянно включенные резисторы, для снижения уровня возникающих перенапряжений при ОДЗ.

Так же в данной работе были выбраны рекомендуемые резисторы для заземления, дугогасящий реактор, автоматические регуляторы настройки ДГР для управления компенсацией во всем диапазоне изменения тока реактора и оборудования для создания нейтральной точки сети для подключения.

Результаты проведенного исследования показали необходимость перехода к резистивному или комбинированному способу заземления, это является мероприятием по ограничению перенапряжения при замыканиях на землю. Исполнения данных мер обеспечит безаварийную работу электрооборудования сети, избежать повреждения при ОЗЗ, а также повысить надежность сети. [1]

6.3 Расчет емкостных токов на ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

Произведем расчет емкостного тока для ПС 110/10 «Черногорская-Городская», для того, чтобы в последующем рассчитать мощность ДГР и резисторов.

Емкостной ток высоковольтной и кабельной линии определяется по формуле:

$$I_{сл} = 1,1 \cdot L \cdot I_{с,уд} \text{ (А)}, \quad (1)$$

где L-длина ЛЭП (км)

$I_{с,уд}$ -удельный ток емкостного замыкания на землю

Удельный ток замыкания зависит от характеристики линии и номинального сечения. Определяется согласно таблице в «Справочнике по проектированию электрических сетей» под редакцией Д.Л. Файбисовича.

Определим значения емкостного тока фидера 29-18 по формуле (1):

$$L_{\text{вл}} = 1,23 \text{ км}$$

$$I_{\text{с.уд.вл}} = 0,0256 \text{ А/км}$$

$$L_{\text{кл}} = 0,06 \text{ км}$$

$$I_{\text{с.уд. кл70}} = 0,9 \text{ А/км}$$

$$I_{\text{сл 29-18}} = 1,1(1,23 \cdot 0,0256 + 0,06 \cdot 0,9) = 0,094 \text{ А}$$

Суммарный емкостной ток на секции шин равен сумме подключенных к этой секции фидеров.

Все расчетные значения емкостного тока фидеров и суммарного тока по шинам приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Результаты расчета емкостного тока ПС 110/10 «Черногорская-Городская».

Фидера	Длина ВЛ, км	I с.уд. ВЛ, км	Длина КЛ, км	I с.уд. КЛ, км	Емк. ток фидера, А	Сумм. ток по 1 с.ш.	Сумм. ток по 2 с.ш.	Сумм. ток по 3 с.ш.	Сумм. ток по 4 с.ш.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
29-05	3,695	0,0256	1,1	1,6	9,297	23,751	0,487	28,256	38,595
29-06	11,465	0,0256			0,323				
29-07	3,695	0,0256			0,104				
29-08					0,000				

Фидера	Длина ВЛ, км	Г с.уд. ВЛ, км	Длина КЛ, км	Г с.уд. КЛ, км	Емк. ток фидера, А	Сумм. ток по 1 с.ш.	Сумм. ток по 2 с.ш.	Сумм. ток по 3 с.ш.	Сумм. ток по 4 с.ш.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
29-10	2,5	0,0256			0,070				
29-15	2,025	0,0256	1,8	1,6	14,350				
29-17		0,0256			0,000				
29-18	1,23	0,0256	0,06	0,9	0,094				
29-19		0,0256			0,000				
29-22					0,000				
29-23			1,725	3,18	20,815				
29-25			2,562	1,6	7,442				
29-28			2,562	1,6	19,208				
29-30			1,745	3,18	19,387				
29-32	0	0,0256			0,000				

6.4 Выбор ДГР для ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

Для выбора необходимого режима заземления нейтрали сети воспользуемся к таблице 8 из СТО 18-2013 «Руководящие указания по выбору режима заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 6-35 кВ».[20]

Таблица 8 – Выбор режима заземления нейтрали сетей 6 и 10 кВ

Значение I_c	Характеристика сети	Рекомендуемый режим заземления нейтрали сети	
		при действии релейной защиты на сигнал (без отключения присоединения с 033)	при действии релейной защиты на отключение присоединения с 033
5..10 А	Кабельные распределительные сети 6 и 10 кВ	Высокоомное заземление нейтрали сети $I_r \sim I_c$	Заземление нейтрали сети через резистор с током, достаточным для обеспечения селективного отключения 033. Требуемая величина тока резистора определяется типом используемых защит от 033.
10..20 А		Точная компенсация тока 033 настраиваемым дугогасящим реактором с возможностью автоматического подключения параллельно реактору низкоомного резистора. В случае использования ДГР без автоматической настройки параллельно реактору устанавливается высокоомный резистор	
Более 20-30 А		Точная компенсация тока 033 настраиваемым дугогасящим реактором с возможностью автоматического подключения параллельно реактору низкоомного резистора.	

Т.к. значение емкостного тока на 3-х секциях шин более 20-30 А, соответственно для данных секций выбираем режим заземления нейтрали с ДГР и низкоомным резистором.

Необходимо выбрать мощность дугогасящего реактора и тип для ПС 110/10 «Черногорская-Городская». При выборе ДГР, в том числе, будем опираться на информацию представленную выше. Согласно п.5.11.8 Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ, будут проведены расчет для 3-х секций шин. Суммарный емкостной ток на данных секциях шин превышает допустимые для сети 10 кВ ток 20 А и составляет: для 1 секции шин $I_c = 23,751$ А, для 3 секции шин $I_c = 28,256$ А и для 4 секции шин $I_c = 38,595$ А. Выбор мощности ДГР осуществляется согласно «Типовой инструкции по компенсации емкостного тока

замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ” РД 34.20.179 [18] по формуле (2):

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_n}{\sqrt{3}}, \text{ кВА}, \quad (2)$$

где I_c - емкостной ток замыкания на землю, А;

U_n - номинальное напряжение сети, кВ.

Мощность для ДГР на 1 секции шин составляет (2):

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 23,751 \frac{10}{\sqrt{3}} = 137,043 \text{ кВА}$$

Выбираем ДГР типа РДМР, который имеет множество преимуществ относительно других реактор отечественного производства. Ближайшее большее значение мощности по номенклатурному ряду, представленному в таблице 9, равно 190 кВА. Соответственно выбираем РДМР- 190/10.

Таблица 9 – Фрагмент номенклатурного ряда реакторов типа РДМР.

Тип реактора	Номинальная мощность, Ква	Номинальное U, кВ	Диапазон токов
РДМР-100/6	100	6	2-30
РДМР-190/6	190	6	3-50
РДМР-190/10	190	10	2-30
РДМР-250/6	250	6	4-70
РДМР-300/6	300	6	5-80
РДМР-300/10	300	10	3-50
РДМР-360/10	360	10	5-100
РДМР-440/6	440	6	6-120
РДМР-485/10	485	10	5-80
РДМР-500/10	500	10	5-80

Аналогично проводим расчет и выбор для других секций шин.

Расчет мощности для 3 секции шин (2):

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 28,256 \frac{10}{\sqrt{3}} = 163,04 \text{ кВА}$$

Ближайшему значению по номенклатурному ряду принадлежит РДМР- 190/10.

Для 4 секции шин (2):

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 38,595 \frac{10}{\sqrt{3}} = 222,7 \text{ кВА}$$

Выбираем реактор номиналом 300 кВА, соответственно РДМР- 300/10.

Все выбранные ДГР сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – Рекомендуемые ДГР для каждой секции ПС 110/10 «Черногорская-Городская».

Секция шин	1 с.ш.	3 с.ш.	4 с.ш.
Рекомендуемый ДГР	РДМР- 190/10	РДМР- 190/10	РДМР- 300/10

6.4 Выбор резистора для ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

Основным параметром резистора, который определяет его физическую сущность, является активное сопротивление резистора R_p . При низкоомном заземлении нейтрали сопротивление резистора должно способствовать разряду емкости неповрежденных фаз за время бестоковой паузы (примерно равное полупериоду промышленной частоты), что исключает возможность развития перенапряжений. [25]

Величина сопротивления резистора R_p определяется по формуле (3):

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{c.n.}) \text{ Ом}, \quad (3)$$

где Z_B – волновое сопротивление, Ом; соответствует максимальной величине волнового сопротивления жилы кабеля (для кабельных линий) и провода (для воздушных линий), которое принимается равным для кабельных и смешанных линий:

$$Z_B = 100 \text{ Ом};$$

$R_{c.n.}$ – емкостное сопротивление некомпенсированной сети, Ом; определяется по формуле (4):

$$R_{c.n.} = \frac{U_\phi}{I_c}, \text{ Ом}, \quad (4)$$

где I_c – емкостной ток сети, А; U_ϕ – фазное напряжение сети, В, которое вычисляется (5):

$$U_\phi = \frac{U_H}{\sqrt{3}}, \text{ кВ}, \quad (5)$$

где U_H – номинальное напряжение сети, кВ. [19]

Проведем расчет и выбор низкоомного резистора для 1 секции шин:

Определим сопротивление (3):

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{c.n.}) = (2,5 \cdot 100 + 242,93) = 494,93 \text{ Ом} \quad (3)$$

Емкостное сопротивление некомпенсированной сети (4), (5):

$$R_{c.n.} = \frac{U_\phi}{I_c} = \frac{5,77}{23,751} = 242,93 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$I_c = 23,751 \text{ А}$$

$$U_\phi = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Структура условного обозначения резистора типа РЗ1

РЗ1 — А — В — С — D

РЗ1 — тип резистора защитного;

А — номинальное сопротивление резистора, Ом;

В — номинальное напряжение сети, кВ;

С — тип исполнения;

D — климатическое исполнение, категория размещения по ГОСТ-15150. [21]

Для данной секции шин рекомендуется использовать резистор производства ООО «Болид» P31-400-10-A-УХЛ1.

Аналогично произведем выбор резистора для 3 секции шин.

Определим сопротивление (3):

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{с.н.}) = (2,5 \cdot 100 + 204,2) = 454,2 \text{ Ом} \quad (3)$$

Емкостное сопротивление некомпенсированной сети (4), (5):

$$R_{с.н.} = \frac{U_\phi}{I_c} = \frac{5,77}{28,256} = 204,2 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$I_c = 28,256 \text{ А}$$

$$U_\phi = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Для данной секции шин, также, рекомендуется использование P31-400-10-A-УХЛ1.

Выбор для 4 секции шин:

Определим сопротивление:

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{с.н.}) = (2,5 \cdot 100 + 149,5) = 399,5 \text{ Ом} \quad (3)$$

Емкостное сопротивление некомпенсированной сети:

$$R_{с.н.} = \frac{U_\phi}{I_c} = \frac{5,77}{38,595} = 149,5 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$I_c = 38,595 \text{ А}$$

$$U_\phi = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Выбираем резистор P31-300-10-A-УХЛ1.

Все рекомендуемые резисторы для данной подстанции сведены в таблицу 11.

Таблица 11 – Рекомендуемые резисторы для 110/10 ПС «Черногорская-Городская»

Секция шин	1 с.ш.	3 с.ш.	4 с.ш.
Рекомендуемый резистор	РЗ1-400-10-А-УХЛ1	РЗ1-400-10-А-УХЛ1	РЗ1-300-10-А-УХЛ1

6.5 Расчет параметров нейтралера ПС 110/10 «Черногорская-Городская»

Расчет производится в соответствии с техническими параметрами нейтралеров ФМЗО для обеспечения надежной работы в режиме ОДЗ.

Мощность нейтралера ФМЗО определяется как (6):

$$S_{\text{фмзо}} = \sqrt{Q_{\text{дгр}}^2 + P_{\text{рез}}^2} \text{ Кв}, \quad (6)$$

где $P_{\text{рез}}$ – мощность резистора, которая определяется по формуле (7):

$$P_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{R\sqrt{3}} \text{ кВт} \quad (7)$$

Произведем расчет мощности и выбор ФМЗО для 1 секции шин:

$$S_{\text{фмзо}} = \sqrt{Q_{\text{дгр}}^2 + P_{\text{рез}}^2} = \sqrt{190^2 + 144,33^2} = 238,6 \text{ кВа} \quad (6)$$

$$P_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{R\sqrt{3}} = \frac{10^2}{400\sqrt{3}} = 144,33 \text{ кВт} \quad (7)$$

Выбираем нейтралер ФМЗО- 500/11 [23]

Аналогично проведем расчет для остальных секций и все полученные данные сведем в таблицу 12.

Таблица 12 – Рекомендуемый ФМЗО для ПС 110/1- «Черногорская-
Городская»

Секция шин	1 с.ш.	3 с.ш.	4 с.ш.
Рекомендуемый ФМЗО	ФМЗО- 500/11	ФМЗО- 500/11	ФМЗО- 500/11

7 Выбор способа заземления нейтрали для ПС 110/10 «Западная»

7.1 Характеристика ПС 110/10 «Западная»

ПС 110/10 «Западная» принадлежит филиалу ПАО «Россети-Сибирь» – «Хакасэнерго». Однолинейная схема данной подстанции представлена на рисунке 10. Она является понизительной подстанцией с односторонним питанием. Была введена в работу в 1963 г. Предназначена для питания потребителей и промышленных предприятий.

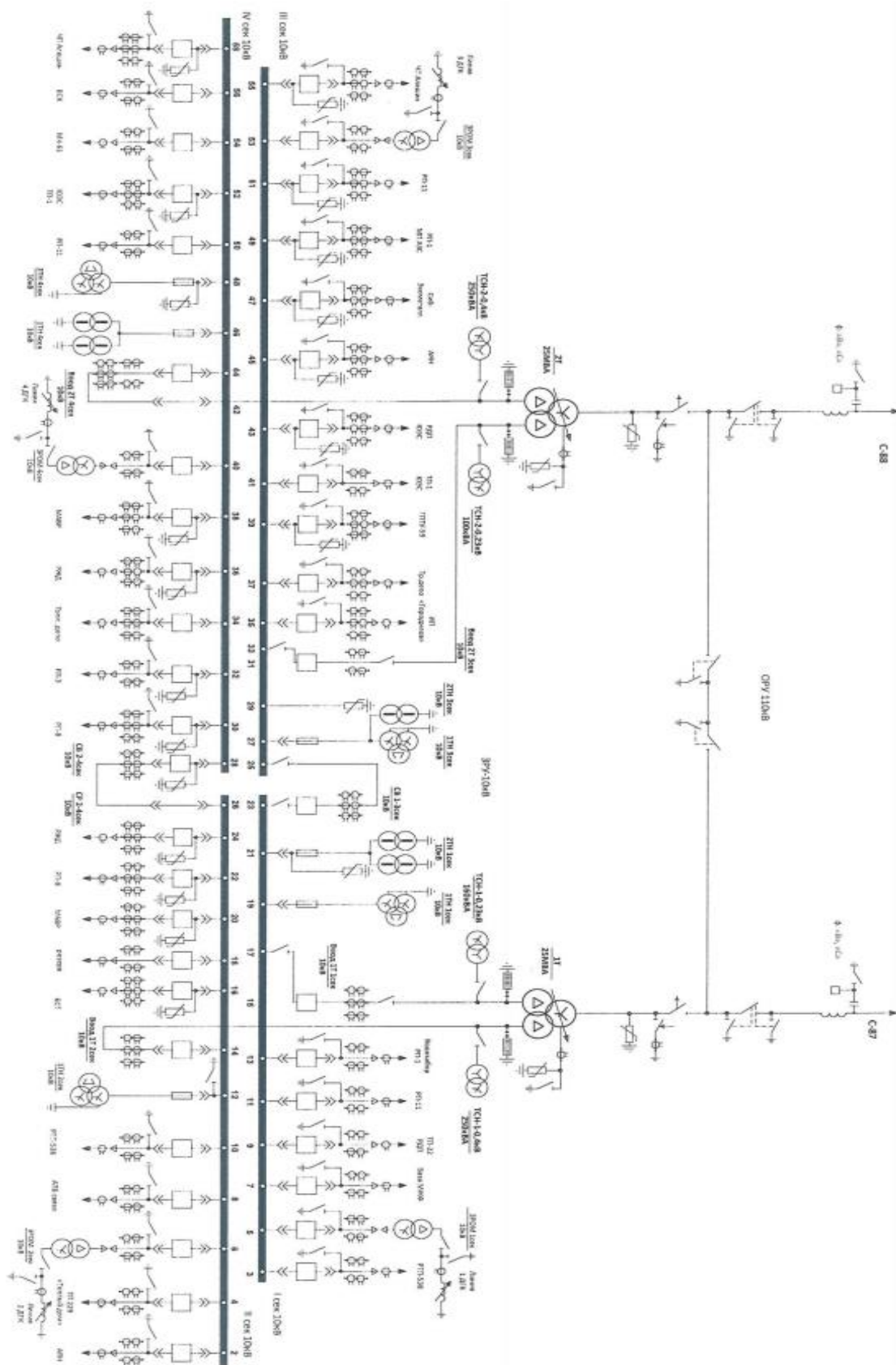


Рисунок 10 – Однолинейная схема ПС 110/10 «Западная»

На подстанции установлено 2 силовых трансформатора номинальной мощностью 25 МВА и 40 МВА. Напряжение на вводы подается по 2-ум резервируемым воздушным линиям ВЛ-110 кВ. Это позволяет производить ремонт и реконструкцию поочередно, не отключая потребителей.

Трансформатор Т1- ТРНДЦН-40000/2500/100 (таблица 13) питает 1 и 2 секции шин через вводный выключатель на 10 А, а Т2 – ТРДН-25000/110 3 и 4 секции шин. Трансформатор ТРНДЦН снабжен вводами ВН и НН. Линейные вводы ВН снабжены трансформаторами тока. Баки трансформатора масляного ТРНДЦН с верхним разъемом снабжается арматурой для заливки, отбора проб, слива и фильтрации масла, подключения системы охлаждения и вакуум – насоса. Расширитель служит для компенсации температурного расширения трансформаторного масла. Характеристики данного трансформатора представлены в таблице 13. Трансформатор ТРДН был описан выше.

Таблица 13 – Характеристика трансформатора

Тип трансформатора	Номинальное напряжение, кВ		Потери, кВт		Uкз, %	Iхх, %
	Uвн, кВ	Uнн, кВ	Pхх, кВт	Pкз, кВт		
ТРНДЦН-40000/250 0/110	115	11	24	302,83/116,91	16,54/10,34	0,27/0,43

От подстанции отходит 58 фидеров, которые питают в основном потребителей района III категории, но также есть электроприемники II категории.

1 секции шин питает:

13 фидер Водозабор РП-1 (РП-распределительная подстанция), 11 фидер РП-11, 9 фидер ТП-22 (ТП- трансформаторная подстанция), 7 фидер

база МЖФ. 17 фидер предусмотрен для ввода 1Т на 1 секцию шин, а 5 фидер для дугогасящего реактора ЗРОМ.

Ко 2 секции шин присоединены:

24 фидер РЖД, 22 фидер РП-8, 20 фидер МАВР, 16 фидер БСТ, 10 фидер РТП-538, 8 фидер АТБ связи, 4 фидер ТП 229 «Теплый дом», 2 фидер АЯН. 18 фидер предназначен для резерва, 14 фидер для ввода 1Т на данную секцию шин, а 6 фидер для ДГР.

3 секция шин:

55 фидер ЧП Алешина, 51 фидер РП-11, 49 фидер РП-1, 47 фидер СибЭкометалл, 45 фидер АЯН, 43 фидер РДП ЮЭС (РДП-распределительный диспетчерский пункт), 41 фидер ТП-1 ЮЭС, 39 фидер ГПТУ-59, 37 фидер троллейбусное депо, 35 фидер ИП «Городилов». 33 фидер для ввода 2Т на 3 секцию, 53 фидер для ДГР.

4 секция шин:

58 фидер ЧП Алешин, 56 фидер ВСК, 54 фидер МК-61, 52 фидер ЮЭС ТП-1, 50 фидер РП-11, 36 фидер РЖД, 34 фидер троллейбусное депо, 32 фидер РП-3, 30 фидер РП-8. 42 фидер предусмотрен для ввода 2Т на 4 секцию шин, а 40 фидер для реактора.

На каждой секции шин установлены трансформаторы напряжения. На 1, 3 и 4 секции шин – 2 трансформатора напряжения, на 2 секции шин- 1. На 1 секции шин: 1ТН типа НТМИ-10, 2ТН- НОМ-10; 3 секция: 1ТН типа НОМ-10, 2ТН НАМИТ-10; 4 секция: 1ТН- НОМ-10 и 2ТН-НАМИТ-10. На 2 секции установлен трансформатор напряжения типа НАМИ-10.

Между 1-3 и 2-4 секциях шин установлены выключатели, которые находится в отключенном положении. Соответственно секции шин работают отдельно.

7.2 Расчет емкостных токов на ПС 110/10 «Западная»

Проводим расчет емкостных токов для ПС 110/10 «Западная».

Рассчитаем емкостной ток на фидере 22-16 по формуле (1):

$$L_{\text{вл}} = 1,251 \text{ км}$$

$$I_{\text{с.уд. вл}} = 0,0256 \text{ А/км}$$

$$L_{\text{кл1}} = 0,191 \text{ км}$$

$$I_{\text{с.уд. кл70}} = 0,9 \text{ А/км}$$

$$L_{\text{кл2}} = 0,025 \text{ км}$$

$$I_{\text{с.уд. кл120}} = 1,1 \text{ А/км}$$

$$I_{\text{сл 22-16}} = 1,1(1,251 \cdot 0,0256 + 0,191 \cdot 0,9 + 0,025 \cdot 1,1) = 0,255 \text{ А} \quad (1)$$

Все значения емкостного тока на ПС 110/10 «Западная» сведены в таблицу 14.

Таблица 14 – Расчет емкостного тока на ПС 110/10 «Западная».

Фидера	Длина ВЛ, км	I с.уд. ВЛ, км	Длина КЛ, км	I с.уд. КЛ, км	Емк. ток фидера, А	Сумм. ток по 1 с.ш.	Сумм. ток по 2 с.ш.	Сумм. ток по 3 с.ш.	Сумм. ток по 4 с.ш.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
22-02	0	0,0256			0,000	27,246	24,230	30,869	38,150
22-03			1,07	1,6	1,883				
22-04					0,000				
22-07	1,6	0,0256	0,4/0,4 23		1,173				

Продолжение таблицы 14

Фиде ра	Длина ВЛ, км	Г с.уд. ВЛ, км	Длина КЛ, км	Г с.уд. КЛ, км	Емк. ток фидер а, А	Сумм. ток по 1 с.ш.	Сумм. ток по 2 с.ш.	Сумм. ток по 3 с.ш.	Сумм. ток по 4 с.ш.
1	2	3	4	5	6				
22-09			0,16	1,1	0,194				
22-10			0,9/1,5 2	1,3/1,1	3,126				
22-11			2,242	1,6	12,569				
22-13	4,111	0,0256	1,861/ 6,642		11,428				
22-16	1,251	0,0256	0,191/ 0,025	0,9/1,1	0,255				
22-18					0,000				
22-20	0,923	0,0256			0,026				
22-22		0,0256	3	1,1	13,405				
22-24			0,5/0,7 2/0,6	1,6/1,1 /1.0	2,411				
22-30		0,0256	3,2	1,1	10,503				
22-32			2,897/ 6,466/ 0,532/ 1,18	1,6/1,1 /0,9/1, 4	15,266				
22-34			1,235	1,1	1,494				
22-35					0,000				
22-36	2,2	0,0256	3,54/1, 4	1,0/1,1	5,650				
22-37			1,25	1,1	1,513				

Окончание таблицы 14

Фиде ра	Длина ВЛ, км	Г с.уд. ВЛ, км	Длина КЛ, км	Г с.уд. КЛ, км	Емк. ток фидер а, А	Сумм. ток по 1 с.ш.	Сумм. ток по 2 с.ш.	Сумм. ток по 3 с.ш.	Сумм. ток по 4 с.ш.
1	2	3	4	5	6				
22-39			1,422/ 0,79	1,5/1,1	3,293				
22-41			0,17	0,9	0,168				
22-43			0,18	1,1	0,218				
22-45	0	0,0256			0,000				
22-47	0	0,0256			0,000				
22-49	4,5	0,0256	2.046/ 4.329/ 0.96/ 0.51 /0.06	1.6/1.1 /1.3 /1.0/ 1.4	10,992				
22-50			1,86	1,6	3,274				
22-51			4,05	1,6	14,669				
22-52			0,16	1,1	0,194				
22-54	3,074	0,0256	0.18/0. 92/0.2/ 0.05	1.6/1.1 /0.9/1. 0	1,769				
22-55	0,6	0,0256			0,017				
22-56	0	0,0256			0,000				
22-58	0	0,0256			0,000				

7.3 Выбор ДГР для ПС 110/10 «Западная»

Расчет проводится по формуле (2), согласно РД 34.20.179. На ПС 110/10 «Западная» на всех 4-х секциях шин емкостной ток превышает допустимый. На 1 секции шин $I_c = 27,246$ А, на 2 секции шин $I_c = 24,232$ А, на 3 секции шин $I_c = 30,869$ А и на 4 секции шин $I_c = 38,150$ А.

Мощность для ДГР на 1 секции шин по формуле (2):

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = 27,246 \frac{10}{\sqrt{3}} = 157,21 \text{ кВА} \quad (2)$$

На данный момент данные о развитии сети на ближайшие 10 лет отсутствует, к полученной мощности ДГР необходимо добавить 25%, т.е. умножить на 1,25.

$$Q_{\text{дгр}} = 157,21 * 1,25 = 196,5 \text{ кВА}$$

Ближайшее значение мощности по номенклатурному ряду 300 кВА. Выбираем РДМР- 300/10.

Аналогично проводим расчет и выбор для других секций шин.

Для 2 секции шин:

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = 24,232 \frac{10}{\sqrt{3}} = 139,82 \text{ кВА} \quad (2)$$

$$Q_{\text{дгр}} = 139,82 * 1,25 = 174,78 \text{ кВА}$$

Соответствует РДМР-190/10.

Для 3 секции шин:

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = 30,869 \frac{10}{\sqrt{3}} = 178,11 \text{ кВА} \quad (2)$$

$$Q_{\text{дгр}} = 178,11 * 1,25 = 222,64 \text{ кВА}$$

Так же, соответствует РДМР-300/10.

Для 4 секции шин:

$$Q_{\text{дгр}} = I_c \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3}} = 38,150 \frac{10}{\sqrt{3}} = 220,13 \text{ кВА} \quad (2)$$

$$Q_{\text{дгр}} = 220,13 * 1,25 = 275,16 \text{ кВА}$$

Выбираем РДМР-300/10.

Все выбранные реакторы для ПС 110/10 «Западная» приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Рекомендуемые ДГР для каждой секции ПС 110/10 «Западная».

Секция шин	1 с.ш.	2 с.ш.	3 с.ш.	4 с.ш.
Рекомендуемый ДГР	РДМР- 300/10	РДМР- 190/10	РДМР- 300/10	РДМР- 300/10

7.4 Выбор резистора для ПС 110/10 «Западная»

Расчет и выбор резистора проводим аналогично, как в пункте 6.4.

Определим сопротивление по формуле (3):

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{\text{с.н.}}) = (2,5 \cdot 100 + 211,77) = 461,77 \text{ Ом} \quad (3)$$

Емкостное сопротивление некомпенсированной сети по формуле (4):

$$R_{\text{с.н.}} = \frac{U_{\phi}}{I_c} = \frac{5,77}{27,246} = 211,77 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$I_c = 27,246 \text{ А}$$

$$U_{\phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Для 1 секции шин рекомендуется использовать резистор производства ООО «Болид» РЗ1-400-10-А-УХЛ1.

Аналогично произведем выбор резистора для 2 секции шин.

Определим сопротивление:

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{\text{с.н.}}) = (2,5 \cdot 100 + 238,14) = 488,14 \text{ Ом} \quad (3)$$

Емкостное сопротивление некомпенсированной сети:

$$R_{с.н.} = \frac{U_{\phi}}{I_c} = \frac{5,77}{24,230} = 238,14 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$I_c = 24,230 \text{ А}$$

$$U_{\phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Для данной секции шин, также, рекомендуется использование Р31-400-10-А-УХЛ1.

Выбор для 3 секции шин:

Определим сопротивление:

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{с.н.}) = (2,5 \cdot 100 + 149,5) = 436,92 \text{ Ом} \quad (3)$$

Емкостное сопротивление некомпенсированной сети:

$$R_{с.н.} = \frac{U_{\phi}}{I_c} = \frac{5,77}{30,869} = 186,92 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$I_c = 30,869 \text{ А}$$

$$U_{\phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Выбираем резистор Р31-400-10-А-УХЛ1.

Для 4 секции шин:

Определим сопротивление:

$$R_p \leq (2,5Z_B + R_{с.н.}) = (2,5 \cdot 100 + 149,5) = 401,45 \text{ Ом} \quad (3)$$

Емкостное сопротивление некомпенсированной сети:

$$R_{с.н.} = \frac{U_{\phi}}{I_c} = \frac{5,77}{38,150} = 151,45 \text{ Ом} \quad (4)$$

$$I_c = 38,150 \text{ А}$$

$$U_{\phi} = \frac{U_H}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,77 \text{ кВ} \quad (5)$$

Остановимся на Р31-400-10-А-УХЛ1.

В таблице 16 указаны все рекомендуемые резисторы.

Таблица 16 – Рекомендуемые резисторы для ПС 110/10 «Западная»

Секция шин	1 с.ш.	2 с.ш.	3 с.ш.	4 с.ш.
Рекомендуемый резистор	Р31-400-10-А-УХЛ1	Р31-400-10-А-УХЛ1	Р31-400-10-А-УХЛ	Р31-400-10-А-УХЛ

7.4 Расчет параметров нейтралера ПС 110/10 «Западная»

Произведем расчет мощности и выбор ФМЗО для 1 секции шин (6):

$$S_{\text{фмзо}} = \sqrt{Q_{\text{дгр}}^2 + P_{\text{рез}}^2} = \sqrt{300^2 + 144,33^2} = 332,9 \text{ кВа} \quad (6)$$

$$P_{\text{рез}} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{R\sqrt{3}} = \frac{10^2}{400\sqrt{3}} = 144,33 \text{ кВт} \quad (7)$$

Выбираем нейтралер ФМЗО- 500/11

Аналогично проведем расчет для остальных секций и все полученные данные сведем в таблицу 17.

Таблица 17 – Рекомендуемые ФМЗО ПС 110/10 «Западная»

Секция шин	1 с.ш.	2 с.ш.	3 с.ш.	4 с.ш.
Рекомендуемый нейтралер	ФМЗО-500/11	ФМЗО-500/11	ФМЗО-500/11	ФМЗО-500/11

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы по теме «Анализ возможности применения высокоомных и низкоомных резисторов в сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго» были проведены расчеты емкостных токов на ПС 110/10 «Черногорская-Городская» и ПС 110/10 «Западная», а так же определены необходимые методы компенсации емкостных токов, согласно нормативным документам.

Разработаны мероприятия по ограничению перенапряжений и ОЗЗ в сети 10 кВ ПС 110/10 «Черногорская-Городская» и ПС 110/10 «Западная», основанные на переходе к комбинированному или резистивному заземлению нейтрали.

На основе проведенных расчетных исследований для повышения надежности работы сетей 10 кВ рассматриваемых подстанций посредством компенсации, целесообразно установка резисторов.

Для ПС 110/10 «Черногорская-Городская» по итогам расчета емкостных токов были выбраны резисторы для резистивного и ДГР – для комбинированного способа заземления нейтрали.

На ПС 110/10 «Западная» ранее были установлены реакторы, которые на данный момент являются устаревшими. В данной работе были предложены более современные и эффективные ДГР, типа РДМР, а так же выбраны резисторы для 2-ух способов заземления нейтрали.

Реализация указанных мероприятий позволит обеспечить безаварийную работу электрооборудования, избежать его повреждения при ОЗЗ, обеспечить селективную работу релейной защиты, а также существенно повысить надежность электроснабжения потребителей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Емельянов Н.И. научно-исследовательский отчет «Ограничение уровней перенапряжений квазистационарных режимов с применением резистивного заземления нейтрали в сетях 10 кВ ПС «Черногорская-Городская» филиала ООО «МРСК Сибирь» - Хакасэнерго» А.Ю. Васильева, Г.Г. Михайловский, А.А. Кузьмин, И.А. Исаенко – 2010 г.

2. Режимы заземления нейтрали в электрических сетях 6-35 кВ // Школа для электрика [Электронный ресурс] URL: <https://electricalschool.info/main/drugoe/229-rezhimy-zazemlenija-nejjtrali-v.html> (дата обращения: 27.03.2023)

3. Дугогасящие реакторы РЗДПОМ // ЭМЗ [Электронный ресурс] URL: https://www.emz.su/catalog/dugogasyaschie_reaktoryi/ustroystvo-2/ (дата обращения: 30.04.2023).

4. Принцип действия дугогасящего реактора // ООО ВП «НТБЭ» [Электронный ресурс] URL: <https://ntbe.ru/publikatsii/printsip-deystviya-dugogasyashego-reaktora/> (дата обращения: 09.04.2023).

5. Дугогасящие реакторы РДМР в компактном исполнении // ООО ВП «НТБЭ» [Электронный ресурс] URL: <https://ntbe.ru/publikatsii/dugogasyashie-reaktory-rdrm-v-kompaktnom-ispolnenii/> (дата обращения: 22.05.2023).

6. Дугогасящие реакторы ZTC и ASR // ЕГЭ-ЭНЕРГАН [Электронный ресурс] URL: <https://www.ege-energan.ru/dugogasyashhie-katushki-petersona-6-35-kvt/dugogasyashhie-reaktory-ztc-i-asr/> (дата обращения: 22.05.2023).

7. Дугогасящие управляемые реакторы серии РУОМ // ENERGO NOVA [Электронный ресурс] URL: <https://energonova.ru/catalog/ramenergy> (дата обращения: 22.05.2023).

8. Конструкция дугогасящих реакторов // Электрические сети [Электронный ресурс] URL: <https://leg.co.ua/arhiv/podstancii/rezhimu-neutrali-elektricheskikh-setey-21.html> (дата обращения: 21.05.2023).

9. О предприятии // Компания ЭНСОНС [Электронный ресурс] URL: <https://ensons.ru/company> (дата обращения: 06.04.2023).

10. Евминов, Л.И. Резистивное заземление нейтрали в распределительных сетях 6-35 кВ/ Л.И.Евминов, Т.В. Алферов// Агротехника и энергообеспечение. - 2019.- Т.3, №24. – С.94-109.

11. Востросаблина Виктория Резисторное заземление нейтрали в сетях среднего напряжения: «ЗА» и «ПРОТИВ». Московская кабельная сеть // Электроэнергия . Передача и распределение.. - 2014. - №5. - С. 31-34.

12. Куликова, Н.А. Резистивное заземление нейтрали - способ повышения надежности работы электрических сетей 6-35 кВ / Н.А. Куликова, О.Н. Титаренко, В.А. Тяпкина // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т. 4, № 2. – С. 32-38.

13. Лукина, Г.В. Способы заземления нейтрали в сетях 6-35 кВ / Г.В. Лукина, С.И. Бондаренко, Е.В. Смаркина // Вестник ИРГСХА. – 212. – № 50. – С. 135-142.

14. Халилова, Ф.А. Характеристики дугогасящих реакторов, применяемых для компенсации емкостных токов / Ф.А. Халилова, Б.Б. Бойназаров // Проблемы науки. – 2019. – № 10(46). – С. 11-15.

15. Высокоомные резисторы типа РЗ для заземления нейтрали сетей 6-35 кВ // ООО «БОЛИД» [Электронный ресурс] URL: <http://pnpbolid.com/produkcija/rezistory-dlja-zazemlenija-nejtrali/vysokoomnye-rezistory-tipa-rz-dlja-zazemlenija-nejtrali-setej-6-35-kv/> (дата обращения: 11.05.23).

16. Бруй С.Р., Ильиных М.В., Сарин Л.И., Хлопова А. Ю Резисторы для заземление нейтрали в сетях 6-35 кВ // 2019

17. О компании // ООО «БОЛИД» [Электронный ресурс] URL: <http://pnpbolid.com/o-kompanii/> (дата обращения: 01.05.23).

18. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6 – 35 кВ. РД 34.20.179 [Электронный ресурс]. [Электронный ресурс] – URL: https://ohranatruda.ru/ot_biblio/norma/250777/(дата обращения: 19.05.23).

19. Лопато А.А. «Расчет низкоомного резистивного заземления» // С. 230-234.

20. СТО 18-2013 «Руководящие указания по выбору режима заземления нейтрали в электрических сетях напряжением 6-35 кВ» - Введ. 25.06.13- с.23

21. Резисторы типа РЗ1 для заземления нейтрали сетей 6-10 кВ // ООО «БОЛИД» URL: <http://pnpbolid.com/produkcija/rezistory-dlja-zazemlenija-nejtrali/rezistory-tipa-rz1-dlja-zazemlenija-nejtratriali-setej-6-10-kv/> (дата обращения: 02.06.23).

22. Трансформатор силовой ТРДН-25000/110 // Transformator220.ru URL: <https://transformator220.ru/harakteristiki/silovye/transformator-silovoj-trdn-25000-110.html> (дата обращения: 08.06.23).

23. Лурье А.И., Панибратец А.Н., Зенов В.П. Серия нейтралеров ФМЗО // С. 153-165.

24. Трансформаторы вывода нейтральной точки ТЕГЕ // ЕГЕ-ЭНЕРГАН URL: <https://www.ege-energan.ru/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F/transformatory-tege/> (дата обращения: 13.05.23).

25. Челазнов А.А. Методическое указание по выбору режима заземления нейтрали в сетях напряжением 6 - 10 кВ предприятий ОАО «ГАЗПРОМ».

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО
институт

Электроэнергетика, машиностроение и автомобильный транспорт
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
А. С. Торопов
подпись инициалы, фамилия
«30» 06 2023 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код – наименование направления

Анализ возможности применения высокоомных и низкоомных резисторов
в сетях филиала ПАО «Россети Сибирь» - «Хакасэнерго»
тема

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

Абакан 2023