

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Режимы работы электрических источников питания, подстанций, сетей и систем
(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Влияние переходных процессов при однофазном коротком замыкании на действие релейной защиты в кабельных сетях 6-10 кВ»

Студент

С.С. Васильев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

С.В. Шаповалов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« ____ » _____ 2017 г.

Тольятти 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1 Анализ возможных причин появления коротких замыканий и методы: контроля и защиты, кабельных линий на напряжение 6-10 кВ.....	7
1.1 Общие причины возникновения коротких замыканий кабельных линий	7
1.2 Методы, способы контроля и защиты кабельных линий	9
1.2.1 Методы и способы контроля кабельных линий.....	9
1.2.2 Методы и способы защиты кабельных линий	13
1.3 Выводы и задачи	33
2 Математические модели кабельных сетей 6-10 кВ для исследования влияния переходных процессов при однофазном коротком замыкание на работу релейной защиты.....	35
2.1 Сравнительный анализ минимального уровня ВГ в имитационных моделях.....	35
2.2 Анализ максимального уровня ВГ в токе ОЗ в сетях 6-10 кВ	41
2.3 Анализ факторов, влияющих на нестабильность уровня ВГ	42
2.3.1 Оценка общих факторов, влияющих на нестабильность ВГ.....	42
2.3.2 Расчет колебаний общего уровня ВГ в токе ОЗ кабельных сетей 6- 10 кВ	45
2.3.3 Аналитическая оценка нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ	47
2.4. Модели кабельных сетей для исследования высших гармонических составляющих в токах ОЗ при переходных процессах	51
2.4.1 Модели кабельных городских и промышленных сетей электроснабжения для исследования переходных процессов при ОЗ	52
2.4.2 Аналитический метод определения параметров кабельных линий 6-10 кВ для исследования переходных процессов	54
2.4.3 Анализ соотношений мгновенных значений переходных токов в поврежденном и неповрежденных присоединениях при ОЗ в кабельных сетях	

6–10 кВ влияющих на селективность и устойчивость релейной защиты	55
2.4.4 Анализ частотного спектра в поврежденных и неповрежденных кабельных линиях на напряжение 6-10 кВ при возникновении ОЗ	58
2.5 Анализ влияния режима заземления нейтрали на возникновение и переходных процессов, протекающих при ОЗ.....	60
2.6. Зависимость изменения рабочего диапазона частот от общей емкости сети в момент возникновения ОЗ	63
2.6.1 Анализ диапазона изменения частот, основных составляющих тока переходного процесса при ОЗ.....	63
2.6.2 Анализ влияния фильтрации высокочастотных составляющих на потери в сигнале переходного тока.....	65
2.7 Анализ распознавания дуговых прерывистых коротких замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ с учетом заземления нейтрали.....	69
2.7.1 Область применения распознавания дуговых прерывистых замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ.....	69
2.7.2 Прямой способ контроля дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ.	71
2.7.3 Косвенный способ контроля дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ.....	72
2.7.4 Анализ методики косвенного способа распознавания дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ.....	73
2.7.5 Анализ косвенного способа распознавания дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ, путем контроля общего уровня ВГ в переходном токе нулевой последовательности	76
3 Повышение эффективности релейной защиты кабельных сетей на напряжение 6-10 кВ с учетом технологических особенностей потребителя и эксплуатируемой сети.....	80

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	90
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	92

ВВЕДЕНИЕ

Кабельные линии являются одним из основных передающих механизмов электроэнергии от объектов генерации до потребителя. В России кабельные линии выполняются на все классы напряжения от низкого до высокого. До 1кВ это система низкого напряжения, а свыше 1 кВ высокого. В классе высокого напряжения выделяют класс, который называется средним (6-35кВ).

Кабельные линии 6-10 кВ являются вторыми по протяженности после сетей 0,4-0,22 кВ. Напряжение 6-10 кВ выбрано для городских сетей и для сетей генераторного напряжения.

Множество действующих кабельных линий выполнено на основе бумажно-пропитанной изоляции. На вновь проектирующихся объектах кабель с бумажно-пропитанной изоляцией выводятся из эксплуатации или не рассматриваются. В настоящее время применяются кабели из сшитого полиэтилена, однако процент устаревших и негодных к эксплуатации кабельных линий с бумажной изоляцией очень высок (85%), поэтому проблема защиты стоит очень остро.

Кабельные линии на напряжение 6-10 кВ необходимо защищать, поскольку они являются связующим звеном между линиями высокого и низкого напряжения. Однако неопределенность вида заземления и в результате возможности возникновения множества деструктивных последствий, осложняет защиту данного технического изделия. В частности, возникновение аварийного режима, сопровождающегося различными последствиями, то есть возможное возникновение перенапряжений высокой кратности (3 и более) или их отсутствие ведет к различным режимам возможным режимам работы.

В данной работе мы рассматриваем самое распространенное замыкание в кабельных сетях 6-10 кВ. Однофазное короткое замыкание может быть устойчивым или не устойчивым, то есть через перемежающуюся дугу. Устойчивое короткое замыкание можно не отключать, если данный процесс разрешен технологическим процессом и регламентирующими документами.

Однако замыкание через перемежающуюся дугу необходимо отключать независимо от технологического процесса и документов, разрешающих работу с однофазным замыканием (ОЗ). ОЗ через перемежающуюся дугу приводит к термическому воздействию на место пробоя изоляции к перенапряжениям на неповрежденных фазах и в частных случаях к повреждению трансформаторов напряжения.

Целью данной работы является повышение эффективности действий релейной защиты в кабельных сетях 6-10 кВ.

Задачи, которые были поставлены в данной работе:

- 1) Анализ факторов, влияющих на релейную защиту в кабельных сетях 6-10 кВ;
- 2) Математическое и программное моделирование факторов, влияющих на релейную защиту в кабельных сетях 6-10 кВ;
- 3) Разработка рекомендаций и требований для повышения эффективности релейной защиты в кабельных сетях 6-10 кВ.

1 Анализ возможных причин появления коротких замыканий и методы: контроля и защиты, кабельных линий на напряжение 6-10 кВ

В данной главе рассматриваются причины, типы возникновения коротких замыканий кабельных линий в сетях 6-10 кВ. Какую опасность несут короткие замыкания с учетом технологического процесса. Факторы, влияющие на выборы релейной защиты в сетях 6-10 кВ кабельных линий. Рассмотрен вопрос влияния диагностических методов на предупреждение местных повреждений кабельных линий в сетях 6-10 кВ.

Рассмотрены задачи, которые необходимо решить для повышения эффективности применения релейной защиты.

1.1 Общие причины возникновения коротких замыканий кабельных линий

Безопасность и надежность систем электроснабжения выполненных кабельными линиями 6-10 кВ, определяет релейная защита. В больших городах и в крупных промышленных предприятиях, передача электрической энергии осуществляется по кабельным линиям. Большая часть кабельных линий выполнена с бумажной изоляцией (до 85%), но в настоящее время в России при проектировании и модернизации применяются кабельные линии из сшитого полиэтилена. Срок эксплуатации для кабелей с бумажной изоляцией составляет 30 лет. В настоящее время в эксплуатации находится множество кабельных линий, выработавших свой срок службы. Изоляция выработавшая свой срок службы может привести к короткому замыканию, однофазному или многофазному.

Причины возникновения повреждений кабельных линий множество:

- 1) предшествующие механические повреждения – 43 %;
- 2) непосредственные механические повреждения строительными и другими организациями – 16 %;

- 3) дефекты в соединительных муфтах и концевых заделках во время монтажа – 10 %;
- 4) повреждение кабеля и муфт в результате осадки грунта – 8 %;
- 5) коррозия металлических оболочек кабелей – 7 %;
- 6) дефекты изготовления кабеля на заводе – 5 %;
- 7) нарушения при прокладке кабеля – 3 %;
- 8) старение изоляции из-за длительной эксплуатации или перегрузок – 1 %;
- 9) прочие и неустановленные причины – 7 %.

Исходя из приведенной выше статистики видно, что основные повреждения наносятся в результате неправильной эксплуатации кабельных линий. Но как было сказано ранее в настоящее время 85 % являются кабели с бумажной изоляцией, и большая часть уже выработала свой срок службы. Главным фактором возникновения повреждений кабелей с бумажной изоляцией, является высыхание и старение бумаги пропитанной маслом, для кабелей из сшитого полиэтилена это триинги (рисунок 1), которые развиваются во время эксплуатации или при неправильном монтаже кабельных муфт.



Рисунок 1.1 - Развитие триинга в кабеле из сшитого полиэтилена

В результате не правильного монтажа или несоблюдение технологического процесса при производстве идет образование триингов. Триинги это древовидные образования, которые образуются в результате наличия влаги в изоляции и воздействия электрического поля. Такие разрушения изоляции ведут к ее постепенному разрушению и пробоем, что в

свою очередь к возникновению короткого замыкания на землю. Существуют две разновидности триингов: триинги типа "веер" или как еще называют типа "куст" и триинги типа "бант". Триинги типа "куст" образуются от начала изоляции, где существует неоднородность между изоляцией и полупроводящим слоем. Триинги типа "бант" образуются в результате наличия в изоляции микропор и трещин. Самый опасный вид триинга - это триинг типа "куст". Триинг типа "бант" растет медленней чем другой тип триинга и со временем может вообще перестать расти. К примеру исследования, кабельной линии "на напряжение 11 кВ" в Норвегии проложенной через пролив Тромсесунд, которая была эксплуатировалась более 10 лет, было выявлено более десятков триингов типа "бант" и не одного включения типа "куст". Исходя из этого можно говорить о том, что триинги типа "куст" необходимо находить своевременно, в то время как с триингами типа "бант" кабельная линия может проработать длительное время. В результате вышесказанного встает вопрос: Что же необходимо для обеспечения потребителя бесперебойным электроснабжением, постоянная и своевременная диагностика или развитая релейная защита или совокупность диагностики и релейной защиты

1.2 Методы, способы контроля и защиты кабельных линий

1.2.1 Методы и способы контроля кабельных линий

Контроль изоляции может только дать данные для прогнозирования развития пробоев изоляции, ведущие к нарушению электроснабжения потребителя. По сути контроль не может предотвратить короткое замыкание, он может только предупредить о наступающей проблеме, поэтому данный вопрос актуален с точки зрения целесообразности применения контроля кабельных линий. Для контроля разработано множество технических решений и разработано методов.

Существует множество способов и методов контроля изоляции:

- 1 Измерение сопротивления изоляции;
- 2 Измерение диэлектрических потерь;

- 3 Измерение частичных разрядов;
- 4 Измерение емкости кабельных линий;
- 5 Измерение влажности изоляции;
- 6 Тепловизионный метод;
- 7 Рентгеновский метод;
- 8 Измерение и анализ возвратного напряжения;
- 9 Метод рефлектомии.

Рассмотрим каждый в отдельности чтоб понять насколько это трудоемко и эффективно.

Измерение сопротивления изоляции - это метод основанный на измерение сопротивления изоляции между фазами, фазами относительно земли (для линий 6-35 кВ). Все замеры выполняются Мегомметром и могут проводится по месту с использованием минимального количества людей.

Измерение диэлектрических потерь производится путем пропускания повышенного напряжения через кабельную линию. В результате пропускания производим замер $\text{tg}\delta$ который характеризует диэлектрические потери, то есть чем больше $\text{tg}\delta$, тем больше диэлектрические потери. Для проведения таких испытаний необходимо устройство с возможностью регистрирования $\text{tg}\delta$, с контролем приложенного напряжения и преобразователем напряжения. Данный метод измерения требует специального инструментального обследования.

Измерение частичных разрядов - это метод основанный на регистрации коротких импульсных сигналов, возникающих при возникновение частичных разрядов. Частичные разряды шунтируют изоляцию кабельной линии и постепенно разрушают изоляцию кабельной линии. Возникновение частичных разрядов возникает из-за несовершенства изоляции в результате старения или ошибок завода изготовителя и наличия газовых или воздушных образований с водяной основой.

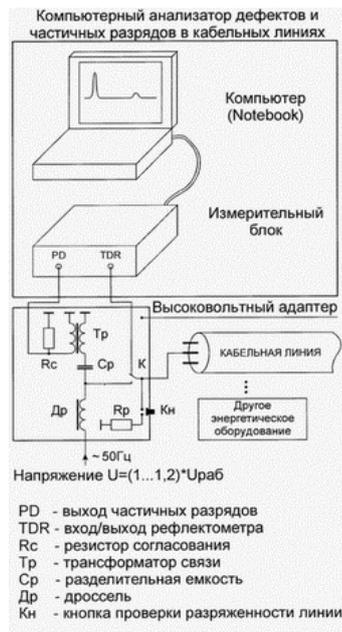


Рисунок 1.2.1- Структурная схема измерения частичных разрядов

Как видно из рисунка 1.2.1 для проведения данного обследования необходимо иметь специальное оборудование, а именно ноутбук, измерительный блок, высоковольтный адаптер. Ноутбук и измерительный блок чаще всего объединены. Исходя из вышесказанного для данного обследования необходим специализированный персонал и оборудование.

Измерение емкости кабельных линий производится по принципу «жила-жила», «жила-земля», поскольку емкость кабеля схожа с емкостью конденсатора, где роль обкладок выполняют поверхность токопроводящей части кабеля, а диэлектриком служит изоляционный материал жил кабеля.

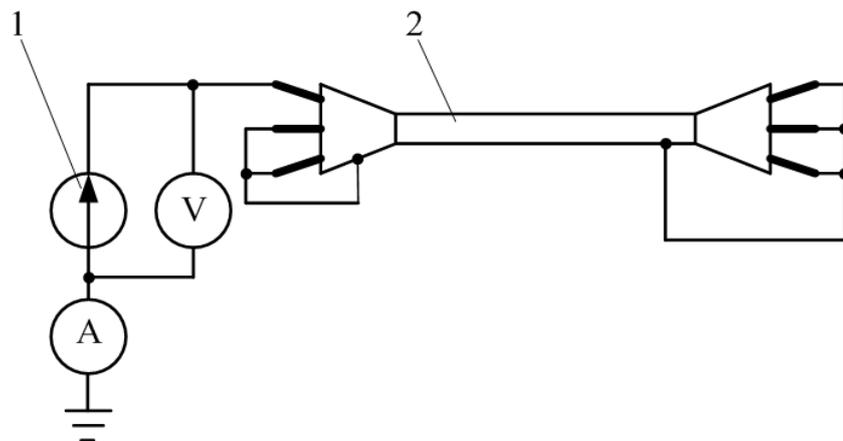


Рисунок 1.2.2 – Принципиальная схема определения рабочей емкости кабеля (1-источник переменного напряжения; 2-кабель)

Для определения емкости кабеля необходимо специальное оборудование.

Измерение влажности изоляции, а именно коэффициента абсорбции, производится в методе, описанном выше (сопротивление изоляции). Измерение производится путем отношения сопротивления измеренного через 60 сек. к сопротивлению, измеренному через 15 сек. после начала измерения.

Тепловизионный метод контроля необходим для оценки отвода тепла при больших токовых нагрузках, поскольку при плохом отводе тепла происходит разрушению изоляции ведущее к необратимым разрушениям изоляции. Для данного метода необходимо специальное оборудование (телевизионная камера, тепловизор) и обученный персонал.

Рентгеновский метод – это метод основанный на рентгенографии кабеля, данный метод успешно применяется в медицине. Данный метод применяется для определения причин возникновения коротких замыканий и оплавления жил кабеля, поскольку можно получить полную картину происходящего в кабельном изделии. Для проведения контрольных испытаний кабельных линий необходимо специально оборудование и обученный персонал.

Метод обратного напряжения основан на пропускание постоянного напряжения малой величины (1-2кВ) и измерения времени тока зарядки, восстанавливающего напряжение после кратковременной разрядки. Данный метод является неразрушающим методом и при его проведении производится анализ: величины возвратного напряжения; время достижения максимальной величины возвратного напряжения; скорость нарастания возвратного напряжения. Для контроля изоляции кабеля данным методом необходимо специальное оборудование и обученный персонал для получения необходимых характеристик и анализа полученных данных.

Метод рефлектомии основан на зондирование кабеля импульсным напряжением. На кабель подаются зондирующие импульсы и регистрируются отраженные от места повреждения импульсы. Происходит определение расстояния до повреждения по временной задержке отраженного импульса относительно зондирующего. С генератора импульсов зондирующие импульсы

подаются в линию. Отраженные импульсы поступают с линии в приемник, в котором производятся необходимые преобразования над ними. С выхода приемника преобразованные сигналы поступают на графический индикатор. Все блоки импульсного рефлектометра функционируют по сигналам блока управления. Для проведения данного метода контроля кабеля необходимо специальное оборудование и хорошо обученный персонал.

Вывод:

В данной главе мы кратко рассмотрели разрушающие и неразрушающие методы контроля изоляции кабельных линий. Как видно из всего вышеизложенного все методы (за исключением измерения сопротивления) требуют сложного инструментального обследования, специального обученного персонала. Все методы требуют выведения кабельной линии из работы для проведения соответствующих мероприятий, что ведет к отключению электроприемников, поэтому предупреждение повреждений не является актуальным вопросом, поскольку вопрос возникновения триингов как сказано в главе 1.1 не достаточно изучен.

1.2.2 Методы и способы защиты кабельных линий

Релейная защита-это основная многоуровневая защита кабельных линий от коротких замыканий. Поскольку многие эксплуатируемые кабельные линии выработали свой срок эксплуатации, при выборе алгоритмов защит необходимо учитывать данный фактор. Защиты подразделяются на защиты от многофазных и от однофазных замыканий (ОЗ). В данном разделе мы рассмотрим защиты от однофазных коротких замыканий, данный вид замыкания является очень опасным, но в тоже время допускается не отключать данный вид замыкания, а отстраивать защиту на сигнал. Так же очень тяжело в результате малого установившегося тока на землю, соблюдать селективность и чувствительность релейной защиты. В результате сложности обнаружения ОЗ и возможности не отключать замыкание при выборе защит необходимо учитывать множество факторов: заземление нейтрали, протяженность линии, влияние короткого

замыкания на потребителя с учетом его особенностей т.п. Каждый фактор выбора не меняет основных требований к релейной защите, но влияет на обеспечение данных требований.

Первый фактор – это соотношения между собственными емкостными токами присоединений и суммарным емкостным током всей электрически связанной сети.

Второй фактор-это заземление нейтрали. В сетях 6-10 кВ их можно разделить на две группы: изолированная и компенсированная. В России компенсирование нейтрали осуществляется:

- заземленная через дугогасящий реактор с шунтирующим резистором;
- заземленная через резистор (низкоомный или высокоомный).

Согласно п.1.2.16 последней редакции ПУЭ, «...работа электрических сетей напряжением 3-35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор». В данной работе мы рассматриваем напряжения 6-10 кВ. На напряжениях 6-10 кВ применяется изолированная нейтраль.

Изолированная нейтраль - это такой вид заземления, при котором нейтральная точка не присоединяется к заземляющему устройству. ПУЭ ограничивает применение режима изолированного заземления нейтрали при больших емкостных токах замыкания на землю:

- более 30 А при напряжении 3-6 кВ;
- более 20 А при напряжении 10 кВ;
- более 15 А при напряжении 15-20 кВ;
- более 10 А в сетях напряжением 3-20 кВ, имеющих железобетонные и металлические опоры на воздушных линиях электропередачи, и во всех сетях напряжением 35 кВ;
- более 5 А в схемах генераторного напряжения 6-20 кВ блоков «генератор–трансформатор».

Как отмечено в иностранных источниках: «Изолированная нейтраль является одной из базовых проблем, влияющих на технические и

экономические решения энергосистем» [5]. Изолированная нейтраль в основном применяется в сетях промышленного и городского электроснабжения, с малым емкостным током. В сочетании с качественным оборудованием энергосистемы, эффективной защиты от внутренних перенапряжений и селективной работой релейной защиты на сигнал допускается работа на сигнал, без отключения ОЗ. Защита от ОЗ не всегда уместно применять с действием на сигнал поскольку в определенных случаях это может привести к серьезным повреждениям защищаемого объекта, а также создать опасность гибели обслуживающего персонала.

При больших емкостных токах замыкания на землю применяется компенсированная нейтраль (заземление через дугогасящий реактор).

Эти сети также известны как резонансные заземленные, или согласно изобретению катушки Петерсена, поскольку это изобретение и есть основа дугогасящего реактора. Дугогасительная катушка была изобретена В. Петерсен в 1916 году в результате своего исследования явлений замыкания на землю [6]. В сетях 6-10 кВ порядка 10% работают с заземлением нейтрали через реактор.

На возможности применяемости защит оказывает наличие трансформаторов тока нулевой последовательности (ТТНП) кабельных линий, при наличии в соответствие с ПУЭ должна применяться стационарная защита от ОЗ. В отличие от сетей промышленного электроснабжения в сетях городского электроснабжения, нет кабельных линий, поэтому установка стационарных устройств защиты от ОЗ не предусматривается. На крупных распределительных пунктах для контроля изоляции применяется трансформаторы напряжения (ТНКИ), имеющим вторичную обмотку, соединенную по схеме разомкнутого треугольника для получения напряжения нулевой последовательности $3U_0$. Поэтому при выборе защиты необходимо учитывать наличие ТТНП и ТНКИ на объекте, поскольку отсутствие данных технических изделий в определённом случае может не позволить требуемой эффективности релейной защиты и качественно защитить потребителя.

Влияние на выбор защит кабельных линий оказывает преимущества изолированной нейтрали. При однофазном коротком замыкание ток замыкания на землю очень мал и в таком режиме можно не отключать ОЗ, но следует отметить что в данном случае рассматривается устойчивое замыкание. В сетях 6-10 кВ в зависимости от заземлений нейтрали возможно возникновения двух видов однофазного замыкания: устойчивое и неустойчивое. Неустойчивое замыкание так же следует разделить на два типа: самоустраняющиеся («клевок») и длительно дуговые прерывистые. Согласно теориям J. Peters и J. Slepian и Беякова Н.Н., в сетях с изолированной и компенсированной нейтралью при возникновение дугового прерывистого замыкания возникают перенапряжения кратные 3 и более номинальным напряжениям сети. Перенапряжения возникают в результате накопления дополнительного заряда на фазах сети, что сопровождается ростом напряжений на неповрежденных фазах при повторном зажигание дуги короткого замыкания. Накопление дополнительного заряда на емкостях фаз сети возможно только при коротком интервале времени между повторными зажиганиями дуги короткого замыкания. Максимальные кратности напряжений вычисляются по формуле 1.2.1.

$$K_{пер} = \frac{U_{макс}}{U_{ф.н}} \quad (1.2.1)$$

В соответствие с теорией J. Peters время между пробоями диэлектрического промежутка равны половине периода рабочей частоты $T50/2 = 10$ мс. Максимальные кратности перенапряжений, в соответствие с теорией J. Peters 4 и более раза, а в соответствие с J. Slepian и Беякова Н.Н., меньше, и не превышают значений 3,2–3,6. Хотя и в соответствие с теорией J. Slepian и Беякова Н.Н. кратность перенапряжений меньше, но даже такое перенапряжение оказывает разрушающее воздействие на слабых местах неповрежденных фаз изоляции кабельных линий и оказывает существенное

влияние на изоляцию электрических машин. В результате перенапряжений может произойти пробой изоляции, что оказывает термическое воздействие на диэлектрик кабеля и возникает опасность поражения электрическим током персонала. На производствах с повышенной пожароопасностью возникновение открытой дуги в результате однофазного короткого замыкания недопустимо по технике безопасности. Стоит отметить данные исследований, волновых и переходных процессов в сетях 6-10 кВ Дрезденского технического университета (Netzanalizator), где утверждается что средне квадратичное значение тока повышается в 10 и более раз. Следовательно, работа с однофазным коротким замыканием не всегда уместна. Она зависит от множества факторов вида короткого замыкания и последствий короткого замыкания, так же необходимо помнить про потребителей, которые не могут работать по технике безопасности с однофазным коротким замыканием (шахтные, карьерные сети, сети угольных разрезов, торфоразработок, сети электрогенераторов и мощных электродвигателей). При выборе алгоритмов защит необходимо учитывать особенности технологического процесса защищаемого объекта.

Рассмотрим существующие виды защит от ОЗ применяемые при эксплуатации энергетических объектов. Существующие виды защит: токовая защита нулевой последовательности, направленная токовая защита нулевой последовательности, защита на основе содержания высших гармоник, защита на с наложением тока другой частоты на рабочий ток.

Ненаправленная токовая защита выполнена на анализе содержания в токе, токов нулевой последовательности, в последствие сравнение величины содержания с верхним допустимым пределом. Для отсеивания токов нулевой последовательности применяется трансформатор тока нулевой последовательности (рисунок 1.2.3).

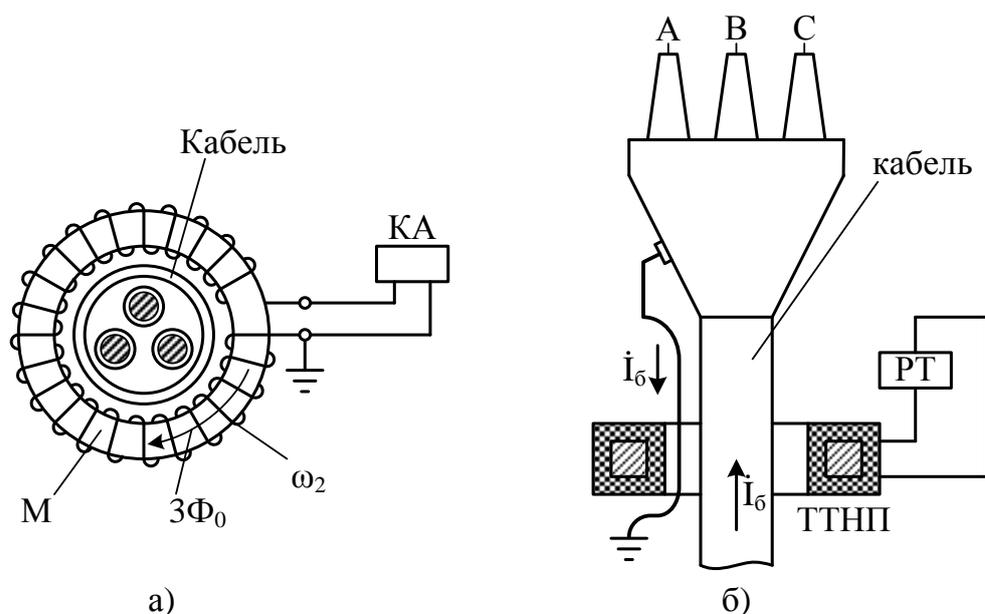


Рисунок 1.2.3 – Структурная схема подключения трансформатора тока нулевой последовательности (в двух проекциях)

Данная защита используется для защиты кабельных линий от однофазных коротких замыканий. Данная защита может применяться для защиты простых конфигураций снабжения электроприемников, поскольку при наличии нескольких электроприемников может работать неселективно. Разные виды заземления нейтрали влияют на селективную работу данной защиты. При изолированной нейтрали ток повреждения очень мал и обнаружить его крайне сложно, поэтому построить селективную защиту очень сложно. При заземлении через дугогасящий реактор как видно из рисунка 1.2.4, защита на разных фидерах может сработать неселективно, поскольку ток нулевой последовательности в поврежденном и неповрежденном фидере совпадает по направлению. Данная защита получила широко распространение в сетях 6-10 кВ, использующих изолированную нейтраль или высокоомное заземление нейтрали. Для выполнения данной защиты могут использоваться электромеханические реле тока (РТ-40, РТ-140, ЭТД-551), реле на микроэлектронной базе (РСТ-11, РСТ-12, РСТ-40, РТЗ-51), а также функции вышеперечисленных реле могут быть реализованы в микропроцессорных устройствах в виде алгоритмов программы.

Условия применимости для всех исполнений ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности (обеспечение требуемой селективности и чувствительности) для сетей с изолированной нейтралью можно представить в виде:

$$I_{Cобс*} = \frac{I_{Cобс}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + K_{отс} \cdot K_{пер} \cdot K_{ч.мин}}, \quad (1.2.2)$$

где $I_{Cобс} = 3 \cdot \omega \cdot C_0 \cdot U_{ф.ном}$ – собственный емкостный ток защищаемого присоединения;

C_0 – емкость фазы на землю защищаемого присоединения; $I_{C\Sigma} = 3 \cdot \omega \cdot C_{0\Sigma} \cdot U_{ф.ном}$ – суммарный емкостный ток электрически связанной сети;

$K_{отс}$ – коэффициент отстройки;

$K_{ч.мин}$ – минимально допустимый коэффициент чувствительности;

$K_{пер}$ – коэффициент, учитывающий внешние воздействия при переходных режимах через перемежающуюся дугу.

Если нейтраль заземлена через высокоомный резистор, условия применимости с учетом сопротивления резистора:

$$R_N \approx X_{C\Sigma} = \frac{1}{3} \cdot \omega \cdot C_{0\Sigma}, \quad (1.2.3)$$

имеют вид:

$$I_{Cобс*} = \frac{I_{Cобс}}{I_{C\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{(K_{отс} \cdot K_{пер} \cdot K_{ч.мин})^2}{2}}}. \quad (1.2.4)$$

Исходя из формул 1.2.2 и 1.2.4 можно сделать вывод, что при постоянных

коэффициентах $K_{отс}$ и $K_{ч.мин}$ условия выбора ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности определяются только относительным значением собственного емкостного тока защищаемого присоединения $I_{Собс*}$ и коэффициентом $K_{пер}$. В соответствии с рекомендуемыми методиками расчетами для расчета уставок ненаправленных токовых защит нулевой последовательности на базе электромеханических реле рекомендуется принимать $K_{пер} = 4-5$ в соответствии с Сирота, И.М. «Защита от замыканий на землю в электрических сетях» или $K_{пер} = 3-5$ в соответствии с Шабад, М.А. «Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей». Для микроэлектронных реле принимают $K_{пер} = 2-3$ в соответствии с Шабад, М.А. «Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей» или $K_{пер} = 2-3$ в соответствии с Корогодский, В.А. «Релейная защита электродвигателей напряжением выше 1 кВ». Но опыт эксплуатации и физико-математические исследования в виде моделирования показали, что для электромеханических реле и части микроэлектронных реле (РТЗ-51) могут быть уменьшены до $K_{пер} = 1,5-2$.

Рекомендации для выбора значений для микропроцессорной релейной защиты носят рекомендательный характер и не имеют точного обоснованного значения. К примеру $K_{пер}$ для ненаправленной токовой защиты SPAC 800 выполненной на микропроцессорной базе рекомендуется принимать 1-1,5, но при этом в рекомендации указано, что данный коэффициент необходимо уточнять у фирмы производителя. В методике описанной в Александров, А.М. «Выбор уставок срабатывания защит асинхронных электродвигателей напряжением выше 1 кВ» рекомендуется принимать $K_{пер} = 1,5-2$, при этом автор ссылается на производителя с необходимостью уточнить коэффициент у фирмы производителя. В методике Соловьев, А.Л. «Методические указания по выбору характеристик и уставок защиты электрооборудования с использованием микропроцессорных терминалов серии SEPAM производства фирмы Шнайдер

Электрик» для ненаправленных токовых защит SEPAM, выполненных на микропроцессорной базе рекомендуется принимать $K_{пер} = 1-1,5$. При этом следует отметить, что не в одной из представленных выше методик не приводится обоснования выбора указанных значений для ненаправленной токовой защиты. Так же следует отметить, что в методиках отсутствует значение коэффициента для кабельных сетей с компенсированной нейтралью (выполненной через резистор или дугогасящий реактор).

Отсутствие обоснованного выбора значения коэффициента $K_{пер}$ при расчете уставок, является одним из основополагающих факторов неселективной работы защиты при внешних однофазных коротких замыканиях.

Среднее значение $K_{пер}$ в соответствии с данными ОРГРЭС для электромеханических реле равна 2, для электростатических реле равна 3.

В соответствии с представленными выше данными и подставив в формулу 1.2.2 получаем, что если собственный емкостной ток защищаемого присоединения не превышает 20% от емкостного тока сети, то возможно использование микропроцессорной ненаправленной токовой защиты.

Описанные выше условия выполняются в сетях с изолированной нейтралью на главных понизительных подстанциях в 70% случаев, на Теплоэлектроцентралях в 90%, на промышленных трансформаторных подстанциях в 100%.

Исходя из представленных выше недостатков и формул 1.2.2 и 1.2.3 следует отметить, что при соотношении собственного емкостного тока присоединения к собственному емкостному току сети не должно превышать 20%. Если данное условие не соблюдается, то необходимо применять токовую направленную защиту нулевой последовательности.

Так же существенное влияние на проблему организации селективной и чувствительной работы ненаправленной токовой защиты нулевой последовательности оказывает применение компенсированной нейтрали, а именно заземление через реактор. Поскольку в результате компенсации ток

однофазного замыкания становится на столько мал, поэтому организовать селективную работу защиты очень сложно. Неселективная работа так же возникает в результате наличия множества присоединений, поскольку возможно протекание токов нулевой последовательности в неповрежденных присоединениях. Как описано в иностранных источниках: «Для уменьшения перенапряжений при эксплуатации системы и для снижения тока ОЗ применяются заземление через высокоомный резистор или резонансное заземление нейтрали» [2]. Но решить данную проблему можно применением резистивного заземления нейтрали и заземлением через реактор с шунтирующим резистором.

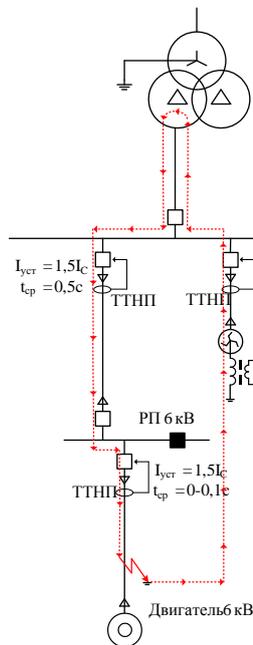


Рисунок 1.2.4 – Однолинейная схема сети 6 кВ, с организацией селективной работы защиты от однофазных коротких замыканий

В сети с резистивным заземлением нейтрали данная защита получила широкое применение поскольку решаются недостатки заземления через реактор и изолированной нейтрали.

Направленная токовая защита нулевой последовательности – это защита применяется при сложной конфигурации сети при наличии 2 и более присоединённых электроприемников. Для выбранного метода требуется множество много параметров сети чтоб обнаружить замыкание на землю. В

результате реле направления мощности — это классическое решение данного вида защиты [8], [9]. Главное отличие от ненаправленной токовой защиты заключается в наличии подключенного датчика(реле) направления тока нулевой последовательности. Первые приборы и по настоящее время выпускающиеся промышленностью защита на полупроводниковых элементах ЗЗП-1 и ЗЗН. Принцип работы и алгоритмы действий положены в основу комплектных микроэлектронных и микропроцессорных устройств релейной защиты. К примеру, в составе комплекте микроэлектронного устройства типа ЯРЭ-2201 предусмотрен блок МО110, принцип работы которого и область применения аналогична реле ЗЗП-1. Направленные токовые защиты нулевой последовательности, а именно алгоритмы действия входят в состав крупных блоков релейной и автоматики защиты. Рассмотрим защиту ЗЗП-1 и принцип действия выполненной на полупроводниковых элементах. На рисунке 1.2.5 представленная защита ЗЗП-1. Защита состоит из измерительного трансформатора тока нулевой последовательности ТЛА, усилителя переменного тока VT-1, VT-2 и схемы сравнения фаз на транзисторах VT-3, VT-4, двух физических величин пропорциональных току нулевой последовательности и напряжению нулевой последовательности поступающих от фильтра тока нулевой последовательности, фильтра напряжения нулевой последовательности и реагирующего элемента ЕА. Рассмотрим принцип работы. Конденсатор С6 сдвигает напряжение по фазе на угол $\pi/2$ относительно тока нулевой последовательности, что позволяет изменять ток срабатывания защиты. Двухкаскадный усилитель переменного тока выполнен транзисторами VT1 и VT2. Он выделяет и усиливает составляющую промышленной частоты выходного напряжения согласующего устройства. Для этих целей на выходе усилителя включен резонансный контур С2-ТЛ с частотой $f_0 = 50$ Гц. Схема сравнения на транзисторах VT-3 и VT-4, необходима для сравнения фаз двух синусоидальных величин. Напряжение U_0 вторичной обмотки трансформатора ТЛ, прямо пропорционально току $3I_0$ нулевой последовательности, смещенного по фазе относительно него на угол $\pi/2$, и

чувствительности $\varphi_{м.ч} = 90^0$, что оптимально для сети с изолированной нейтралью.

В сетях с заземление через резистор или через реактор с шунтирующим резистором соотношение между сдвигом фаз между напряжением нулевой последовательности и током нулевой последовательности существенно отличается от 90^0 . Исходя из этих данных можно сделать вывод, что применением реле типа ЗЗП-1 и блок МО110 не сможет обеспечить требуемой чувствительности при внутренних ОЗ.

В 1998г. на заводе ЧЭАЗ альтернативой для реле ЗЗП-1 выпускается реле ЗЗН. Реле было разработано для сетей с резистивным заземлением нейтрали, в сетях с частичной компенсацией емкостного тока, так же возможно применение в сетях с изолированной нейтраль. Для повышения чувствительности и эффективности при внешних однофазных коротких замыканиях через перемежающуюся дугу, в устройстве в входных цепях тока и напряжения нулевой последовательности применяется полосовые фильтры для выделения составляющей промышленной частоты 50 Гц.

Такой подход нашел применение и в устройствах, выполненных на микропроцессорной базе, однако достоверных данных об повышение эффективности и чувствительности токовой направленной защиты нулевой последовательности фирмы разработчики не приводят.

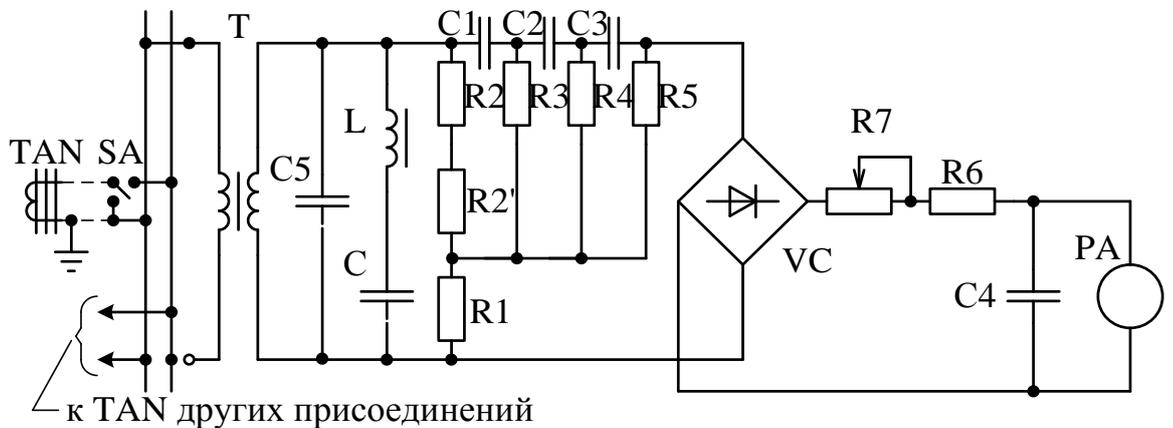
Защиты по направлению тока нулевой последовательности так же реализованы в микропроцессорных устройствах релейной защиты типа SPAC, MICOM, TOP и т.п. Для реализации данного вида защит существует алгоритм, который описывает действия защиты. Сигнал с трансформаторов тока нулевой последовательности поступает в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), где происходит его преобразование для обработки его процессором и выполнения заданного алгоритма защиты.

Токовая направленная защита применяется при изолированной нейтрали, при заземлении через реактор с шунтирующим резистором и заземление через резистор. При заземлении через дугогасящий реактор без шунтирующего

резистора как было описано выше, ток нулевой последовательности в поврежденной и не поврежденной линии может совпадать по направлению, и защита будет работать не селективно реле ЗЗП-1. Устройство ЗЗН частично решает проблему, но при этом технические решения, реализованные в данном устройстве и в устройствах, выполненных на микропроцессорной базе не дает 100% селективности и чувствительности поскольку ложные срабатывания и не срабатывания случаются по данным ОРГРЭС в 20 % случаев от всех срабатываний данных защит.

Исходя из этого можно сделать вывод, что данная защита не является универсальной защитой от ОЗ в сетях 6-10 кВ, поэтому необходимо рассматривать техническое решение применения данной защиты в составе комплексной защиты от ОЗ, либо повышение эффективности и чувствительности, разрабатывая технические решения.

Токовые защиты, основанные на анализе высших гармоник (ВГ) применяются для обнаружения тока нулевой последовательности при возникновении однофазного короткого замыкания. Сложность применения данных защит обусловлена ВГ генерируемыми потребителями электроснабжения. Данная защита применяется на сигнал(защита типа УСЗ-2/2) и на отключение. Защита представлена в некоторых микропроцессорных устройствах: SPAC, RECOM, TOP. Рассмотрим устройство защиты работающем на сигнализацию УСЗ-2/2.



P

Рисунок 1.2.6 – Устройство защиты УСЗ-2/2

Как видно из рисунка 1.2.6, состоит из трансформатора тока нулевой последовательности Т, сглаживающего фильтра LC, конденсатор С5 предназначенного для отстройки сигнала от частоты более 2 кГц, резисторы R1-R5 необходимы для выставления уставок устройства, резисторы R7,R6 необходимы для регулировки чувствительности устройства.

В указанных выше устройствах как правильно используются диапазон частот от 150 до 650 Гц. С достоверностью можно сказать что распределение высших гармоник в диапазоне от 150 до 650 Гц в токе нулевой последовательности соответствуют распределению емкостных токов промышленной частоты в сетях с изолированной нейтралью. Исходя из сказанного выше уставка защиты для не срабатываний при внешних устойчивых однофазных замыканиях и максимальном содержании ВГ в токе нулевой последовательности защищаемого присоединения должна выбираться исходя из формулы:

$$I_{0c.z.i} \geq K_{отс} \cdot \alpha_{макс} \cdot I_{c.i}, \quad (1.2.5)$$

где $K_{отс}$ - коэффициент отстройки;

$I_{c.i}$ - собственный емкостный ток i -го присоединения;

$\alpha_{макс}$ максимально возможный уровень ВГ.

При коротких замыканиях через перемежающуюся дугу общий уровень ВГ в токе нулевой последовательности защищаемого электроприемника резко возрастает, для обеспечения требуемой селективности при внешних замыканиях обеспечивается блокировкой действия при прерывистом характере воздействия входного тока. Например, устройство УСЗ-2/2 так же может работать на отключение для выполнения требуемой селективности отстройка от ОЗ через перемежающуюся дугу и клевки изоляции выполняется с задержкой времени на срабатывание порядка 20-30 мс и быстрым самовозвратом измерительной части устройства.

Коэффициент чувствительности защиты при устойчивых коротких замыканиях i присоединения рассчитывается по формуле:

$$K_{ч.i} = \frac{\alpha_{мин} \cdot (I_{c\Sigma} - I_{c.i})}{I_{0\ c.з.i}} \geq K_{ч.мин}, \quad (1.2.6)$$

где $I_{c\Sigma}$ - суммарный емкостный ток сети;

$\alpha_{мин}$ - минимальный уровень высших гармоник в токах;

$K_{ч.мин}$ - минимально допустимый коэффициент чувствительности защиты.

Из формул 1.2.5, 1.2.6 выведем условие применимости защиты на основе ВГ:

$$I_{c.i*} = \frac{I_{c.i}}{I_{c\Sigma}} \leq \frac{1}{1 + \frac{\alpha_{макс}}{\alpha_{мин}} \cdot K_{отс} \cdot K_{ч.мин}} = \frac{1}{1 + Z \cdot K_{отс} \cdot K_{ч.мин}}, \quad (1.2.7)$$

где Z – параметр, характеризующий степень нестабильности общего уровня ВГ в контролируемой сети.

Минимальный ток срабатывания защиты на основе уровня ВГ определяется из условий:

$$I_{0\ c.з.мин} \leq \frac{\alpha_{мин} \cdot I_{c\Sigma} (1 - I_{c.i*макс})}{K_{ч.мин}}, \quad (1.2.8)$$

где $I_{c.i*макс}$ - максимальный емкостной ток защищаемого присоединения.

Исходя из формул 1.2.7, 1.2.8 можно сделать вывод, что на условие возможности использования защиты оказывают такие факторы как влияние величины $I_{c.i*макс}$, минимальное содержание ВГ $\alpha_{мин}$ и степень нестабильности содержания ВГ в токе ОЗ Z .

Исследование содержания минимального уровня ВГ в токах ОЗ компенсированных кабельных сетей приводятся в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. В исследовании Кискачи В.М. «Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник» приводится оценка нестабильности содержания ВГ в токе ОЗ компенсированных кабельных сетей. Исследования показали, что данный параметр равен $Z=2.5-3$, автор же рекомендует принимать данный параметр с запасом для сохранения требуемой селективности устройства $Z=4$.

Исходя из представленных выше данных принимаем $K_{отс} = 1,5, K_{ч.мин} = 1,5, Z = 4$. Рассчитаем условия применимости защиты на основе ВГ:

$$I_{c.i} = \frac{1}{1+4 \cdot 1,5 \cdot 1,5} = 0,1. \quad (1.2.9)$$

Данное условие выполняется в процентном соотношении от общего числа присоединений на ЦП компенсированных сетей около 77%, РП-90%, ТП-100%. Такие высокие показатели не совпадают с практическими показателями селективности защит на основе замера ВГ, установленных в ЦП, РП, ТП кабельных сетей 6-10 кВ. К примеру по данным ОРГРЭС показатели защиты УСЗ-2/2 селективность оценивается в 2.2 из 5, а чувствительность 3.1 из 5. Такие низкие показатели селективности возникают в результате не точной оценки показателей нестабильности ВГ в токе ОЗ защищаемых присоединений. На практике нестабильность ВГ в токах ОЗ намного выше чем приводится в рекомендациях к расчету уставок защит на основе ВГ.

Следует рассмотреть вопрос определения минимального уровня ВГ в ОЗ и степень нестабильности ВГ в токе ОЗ. Данный вопрос был рассмотрен в начале 60-х годов в работах, представленных выше. В настоящее время нелинейная нагрузка значительно возросла и минимальный уровень ВГ и

степень нестабильности ВГ в токе значительно изменился и требует дополнительных исследований для уточнений данных параметров.

Защита на основе высших гармоник может выполняться с направлением тока нулевой последовательности, то есть кроме определения содержания гармоник тока нулевой последовательности защита определяет направление и тем самым повышает чувствительность и селективность при отстройке защиты в целом. Первые направленные защиты на основе ВГ в токе ОЗ были разработаны в виде реле мощности, реагирующих на одну из гармоник, возникающих в результате ОЗ в сетях 6-10 кВ. В результате нестабильности частотного спектра при ОЗ и других факторов, влияющих на содержание ВГ в сетях 6-10 кВ такие устройства по принципу своего действия не могут обеспечить требуемую устойчивость функционирования. Кискачи В.М. разработал устройство для применения в компенсированных сетях 6-35 кВ основанный на использовании для действия устройства защиты от ОЗ не одной гармонической составляющей, а суммы основных ВГ установившегося тока и напряжения нулевой последовательности. Принцип действия устройства основан на анализе соотношений ВГ в токе и напряжении нулевой последовательности. Соотношения определяются из формулы:

$$3i_{0ВГ.i} = 3C_{0.i} \cdot \frac{du_{0в.з}}{dt} = 3C_{0.i} \cdot a_v \cdot v \cdot \omega \cdot U_{1.m} \cdot \cos(\omega t a_v + \phi_v); \quad (1.2.10)$$

$$3i_{0ВГ.j} = -3 \cdot (C_{0.i} - C_{0.j}) \cdot \frac{du_{0в.з}}{dt} = -3 \cdot (C_{0\Sigma} - C_{0.j}) \cdot a_v \cdot v \cdot \omega \cdot U_{1.m} \cdot \cos(\omega t a_v + \phi_v). \quad (1.2.11)$$

Исходя из формул можно сказать, что формы тока $3i_{0ВГ.i}$ и производная напряжения нулевой последовательности $du_{0в.з} \setminus dt$ в неповрежденном присоединении совпадают, а в поврежденном не совпадают. Рассмотренные соотношения ВГ токов и производная напряжения нулевой последовательности не зависят от нестабильности состава и уровня ВГ, т.е. защиты от ОЗ по данному способу адаптивны к изменениям спектра ВГ в контролируемой сети.

Исходя из этого можно сделать вывод о применимости направленных защит на основе ВГ. Единственное условие применимости - это обеспечение требуемой чувствительности, то есть содержание минимального уровня ВГ в токе ОЗ.

Защиты от однофазных коротких замыканий на основе анализа высших гармоник может применяться на все видах заземлениях нейтралей присущих сетям 6-10 кВ. Устройство УСЗ-2/2 может обнаружить только устойчивое короткое замыкание что является крупным недостатком и данное устройство рекомендуется размещать вне помещения с рабочим персоналом, но в настоящее время на устройствах защиты выполненных на микропроцессорной базе реализуется защита направленной токовой защиты с анализом формы тока и производной напряжения на содержание высших гармоник тока нулевой последовательности. К таким защитам можно отнести «SPAC», «TOP», «Спектр».

Исходя из всего вышесказанного по параметрам, которые используются для отстройки устройств защиты от ОЗ их можно разделить на три группы:

- 1) устройства, основанные на использовании составляющих токов и напряжения нулевой последовательности установившегося режима ОЗ;
- 2) устройства, основанные на использовании токов и напряжений нулевой последовательности, возникающих при переходных режимах ОЗ;
- 3) комбинированные устройства, основанные на использовании составляющих тока и напряжения нулевой последовательности как в переходном, так и в установившемся режиме ОЗ.

Следует добавить, что в России компенсация емкостных токов осуществляется дугогасящими реакторами. Множество дугогасящих реакторов, находящихся в эксплуатации имеют старую конструкцию с ручным регулированием, подмагничиванием без шунтирующего резистора. В результате возникает проблема организации селективной работы защит и обеспечение требуемой чувствительности при возникновении ОЗ в компенсированных сетях 6-10 кВ. В таких сетях не могут использоваться простые токовые защиты и

направленные токовые защиты. Простые токовые защиты не могут использоваться, потому что дугогасящий реактор компенсирует ток однофазного короткого замыкания (ток $3I_0$) в поврежденном присоединении практически до нуля. Направленные токовые защиты не могут использоваться, потому что токи $3I_0$ в поврежденном и неповрежденных фидерах совпадают по направлению. В поврежденном фидере в направлении от шин течет индуктивный ток по величине равный собственному емкостному току фидера, а в неповрежденных фидерах собственные емкостные токи в направлении к шинам. Если реализовано заземление нейтрали через дугогасящий реактор с шунтирующим низковольтным резистором, можно реализовать селективную работу простых и направленных токовых защит от однофазных коротких замыканий. Применение шунтирующего резистора так же решает проблему перенапряжений при возникновении ОЗ через перемежающуюся дугу.

Поскольку рассматриваемая сеть имеют изолированную или компенсированную нейтраль необходимо учитывать, переходной процесс возникающей при коротких замыканиях. При 3-х фазном или межфазном коротком замыкание релейная защита срабатывает на отключение поврежденного объекта. При однофазном коротком замыкание в месте повреждения проходит ток, обусловленный не только емкостью поврежденной фазы относительно земли, но и емкостями поврежденных фаз относительно земли. При неустойчивом контакте в месте замыкания возникает дуговое однофазное замыкание на землю. При этом возникающая дуга может быть неустойчивой, загораться и зажигаться вновь (перемежающаяся дуговое замыкание). В результате возникает множество переходных процессов, следующих друг за другом перераспределяющих заряды между емкостями фаз. Что в свою очередь ведет к повышению напряжения на неповрежденных фазах с фазного на линейного. Повышение напряжение ведет к старению изоляции или разрушению в кабелях с бумажных изоляций в результате возникновения частичных разрядов или к развитию триингов в кабелях из сшитого полиэтилена. При изолированной нейтрали емкость нулевой

последовательности может разрезаться только через трансформаторы напряжения с заземленной нейтралью. Все это способствует возникновению феррорезонансных процессов, зависящих от начальных условий, влияющих на перенапряжения и частоту сигналов тока и напряжения. [1]. Перемежающиеся дуговые замыкания это один из основных причин повреждения трансформаторов напряжения. К примеру, в трансформаторе НТМИ-10 повторное возникновение дуги раньше, чем затухает переходной процесс предыдущего зажигания влечет за собой бросок тока 6-8 А. Если дуга загорается раз в период и реже, ТН может повредиться меньше чем за 5 минут. Следует отметить, что наиболее опасный для ТН режим возникает если зажигание дуги происходит в полуволну напряжения одной полярности (однополярная дуга).

Кроме всех перечисленных негативных последствий, однофазное КЗ через перемежающуюся дугу вызывает появление высших гармоник, которые оказывают влияние потребителей электрической энергии.

Исходя из выше сказанного можно сделать вывод что работа с однофазным коротким замыканием не всегда уместна, поскольку она может приводить к повреждению оборудования и его разрушению. Одно из основных требований — это надежность, поэтому защита должна работать на отключение однофазного короткого замыкания.

1.3 Выводы и задачи

Исходя из всего выше сказанного существует различные разновидности коротких замыканий. Устойчивое короткое замыкание не является опасным в ряде случаев если работа с ним не ограничена техникой безопасности. Короткое замыкание через перемежающуюся дугу можно разделить на самоустраняющееся и постоянное. Самоустраняющееся замыкание может свидетельствовать о начале разрушения изоляции или неправильном монтаже муфт. Постоянное дуговое замыкание несет кроме опасности поражения электрическим током обслуживающего персонала, термическое разрушающее

воздействие в месте возникновения и в результате горения дуги ведет к перенапряжению на не поврежденных фазах. То есть проблема распознавания защитой вида замыкания остается актуальной.

Защиты от ОЗ (кроме защит на основе ВГ) зависят от отношения емкости защищаемого присоединения к емкости сети, вследствие это ведет к ограничению применимости защит.

Вид заземления оказывает влияние отстройку защит. В компенсированных сетях (дугогасящий реактор) как было сказано выше невозможно применение простых защит от ОЗ (исключение защиты на основе ВГ), поскольку не соблюдается условие требуемой селективности и чувствительности. Следовательно, изменение вида нейтрали или доработка дугогасящих реакторов является актуальной задачей.

Защиты на основе ВГ ограничиваются двумя параметрами:

- 1) Минимальный уровень ВГ в токе ОЗ;
- 2) Степень нестабильности ВГ в токе ОЗ.

С учетом всего выше сказанного необходимо применение многофункциональной защиты, а именно применение как минимум двух видов защит для обеспечения требуемой селективности и чувствительности. Необходимо рассмотреть влияние заземления нейтрали на возникновение вида ОЗ и возможность снижения разрушительных влияний ОЗ путем изменения заземления нейтрали.

То есть для повышения эффективности необходимо рассмотреть, как факторы влияют на каждую защиту по отдельности. В частности, как фактор заземления нейтрали влияет на защиты и на последствия, возникающие в результате ОЗ.

2 Математические модели кабельных сетей 6-10 кВ для исследования влияния переходных процессов при однофазном коротком замыкании на работу релейной защиты

2.1 Сравнительный анализ минимального уровня ВГ в имитационных моделях

В работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. для оценки минимального уровня ВГ используются схема замещения, приведенные на рисунке 2.1.

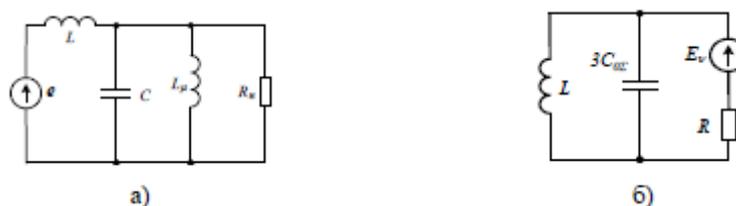


Рисунок 2.1.1 – Расчетные схемы замещения в сетях 6-10 кВ для оценки минимального уровня ВГ в работах, а) Кискачи В.М. и б) Жежеленко И.В.

В схеме замещения (Рисунок 2.1.1 а.) $C = 3C_{0\Sigma}$ – суммарная емкость трех фаз сети на землю, e – эквивалентная ЭДС источника питания; L – суммарная индуктивность питающих трансформаторов центра питания (ЦП); L_{μ} – суммарная индуктивность ветвей намагничивания подключенных трансформаторов нагрузки всех присоединений, $R_{н}$ – суммарное сопротивление нагрузки трансформаторов. Как видно в схеме замещения (Рисунок 2.1.1 а.) не учитывается ряд факторов, влияющих на уровень ВГ в токе ОЗ: сопротивление линий, связывающих распределительный пункт (РП) с питающим пунктом; сопротивление обмоток трансформаторов нагрузки; междуфазные емкости сети; сопротивление системы и др.

Для расчета i -гармоники используется схема замещения (Рисунок 2.1.1 б.). Следует отметить что схема замещения (Рисунок 2.1.1 б.) тоже не учитывает множество факторов как было сказано выше.

Как было сказано выше необходимые исследования по содержанию высших гармоник в токе ОЗ производились еще в 60-х 20 века. Предыдущий

фактор, а также отсутствие рекомендаций по выбору заземления нейтрали ведет к некорректной работе релейной защиты в сетях 6-10 кВ. Исходя из вышесказанного необходимо исследовать процессы, происходящие при возникновении ОЗ, используя современные системы имитационного моделирования (MATLAB программный пакет SIMULINK). Программа MATLAB с программным пакетом SIMULINK дает возможность многофакторного моделирования, что необходимо для корректной оценки факторов влияющих на работу релейной защиты. В программном пакете SIMULINK заложены типовые элементы схем замещения, а также сложные элементы сети с учетом современных методов аппроксимации. К примеру есть простые и сложные схемы замещения трансформаторов, линий передачи электроэнергии, электрических машин и т.п. Для имитационного моделирования была выбрана типовая схема для оценки уровня ВГ в токе ОЗ (рисунок 2.2).

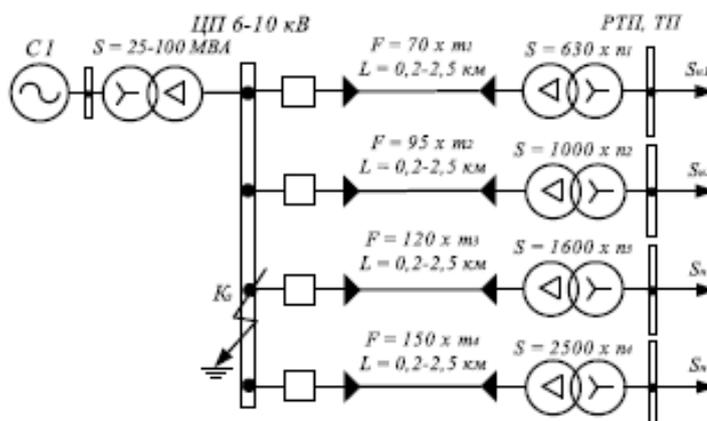


Рисунок 2.1.2 – Обобщенная схема компенсированной кабельной сети ЦП, РП 6-10 кВ промышленного предприятия (городской сети)

Главное отличие от схем замещения в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. (рисунок 2.1.2) - это множество факторов, учитываемых в работе: сопротивление системы; множество трансформаторов разной мощности 6/0.4 кВ с различными номинальными параметрами; сопротивление кабельных линий (сечение и длина), связывающих ТП и ЦП; суммарная индуктивность все ветвей трансформаторов нагрузки; нелинейная нагрузка трансформаторов; несимметрия токов намагничивания по фазам и др. Представленная выше

схема была реализована в программном пакете SIMULINK с учетом параметров существующих сетей (рисунок 2.1.3).

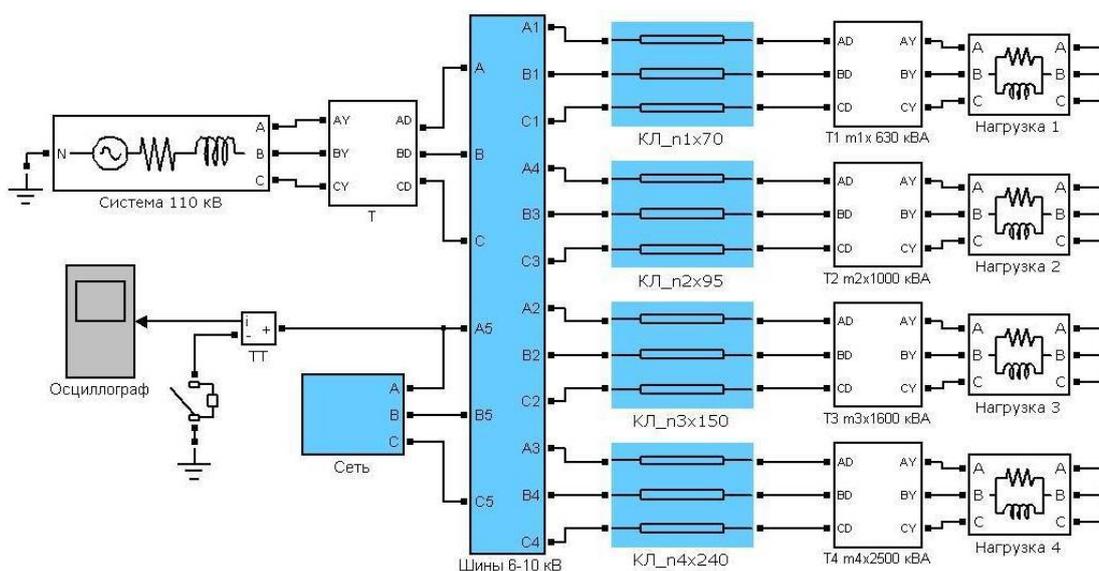


Рисунок 2.1.3 – Структурная схема в программном пакете SIMULINK для оценки минимального уровня ВГ в кабельной сети

На основе полученных данных из существующих кабельных систем с различными значениями суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ городских сетей, промышленного электроснабжения предприятий тяжелой и легкой металлургии, целлюлозно-бумажной, нефтеперерабатывающей и других отраслей промышленности, для всех сетей были определены соотношение мощности питающих трансформаторов и трансформаторов нагрузки, доли трансформаторов нагрузки различной мощности в общем числе приемных трансформаторов 6–10/0,4 кВ, средние значения и диапазоны изменения сопротивление источника питания, длины и эквивалентные сечения кабельных линий, соединяющих ЦП с трансформаторными подстанциями (ТП, РТП). Значения основных параметров расчетной схемы кабельной сети 6–10 кВ по рисунку 2.1.3, получены на основе статистической обработки данных, приведены в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Параметры схемы замещения для оценки минимального уровня ВГ в токе ОЗ

$I_{c\Sigma}, A$	$I^{(3)}_k, kA$	$I_{num.тр.}, MVA$	$I_{кл}, kM$	$S = \frac{S_{num.\Sigma}}{S_{np.\Sigma}}$	Доля в общей мощности трансформаторов с S_H			
					630 кВА	1000 кВА	1600 кВА	2500 кВА
20...100	5...20	25...100	0,3...2,5	0,7...1,5	25%	65%	6%	4%

Достоверность полученных данных физико-математической модели, была произведена путем сравнения с данными реальной существующей схемы. Полученные данные сравнивали с ГПП Новолипецкого металлургического комбината. Полученные данные показали, что погрешность в данных минимального уровня и среднего уровня ВГ в токе ОЗ составляет всего несколько процентов, что можно считать удовлетворительным для расчета параметров релейной защиты.

В результате проведенных исследований на моделях кабельных сетей 6-10 кВ в программном пакете SIMULINK, при изменении параметров в соответствие с таблицей 2.1.1 можно сказать, что минимальный уровень ВГ достигается в фазном напряжении на шинах ЦП и уменьшается с увеличением сопротивления системы в результате трёхфазного короткого замыкания. Так же следует отметить что падение напряжения на шинах ЦП при большой нагрузки, не как не влияет на минимальный уровень ВГ в токе ОЗ при ОЗ на шинах и вблизи шин.

В таблице 2.1.2 и 2.1.3 приведены результаты расчета на имитационных моделях содержания ВГ (5 и 7 гармоника), в токе ОЗ на шинах ЦП, с учетом описанных выше неблагоприятных факторов.

Таблица 2.1.2 – Полученные значения содержания 5,7, минимального уровня гармоник в сети 6 кВ при $S=1,5$

Уровень ВГ в токе ОЗ	$I_{c\Sigma} = 25A$	$I_{c\Sigma} = 50A$	$I_{c\Sigma} = 100A$	$I_{c\Sigma} = 250A$
----------------------	---------------------	---------------------	----------------------	----------------------

Продолжение таблицы 2.1.2

	$S_{num.\Sigma} =$ 20...25 МВА	$S_{num.\Sigma} =$ 31,5...40 МВА	$S_{num.\Sigma} =$ 50...63 МВА	$S_{num.\Sigma} =$ 80...100 МВА
$I_{мин.5}, A$	0,33-0,38	0,88-0,98	2,43-2,67	6,46-7,11
$I_{мин.7}, A$	0,17-0,19	0,4-0,43	1,04-1,15	2,56-2,82
$I_{ВГ.мин.}, A$	0,37-0,42	0,97-1,07	2,64-2,91	6,95-7,65
$\alpha_{мин.} = I_{ВГ.мин.} / I_{c\Sigma}, \%$	1,48-1,68	1,37-1,51	2,64-2,91	2,78-3,06

Таблица 2.1.3 – Полученные значения содержания 5,7, минимального уровня гармоник в сети 6 кВ при S=0,7

Уровень ВГ в токе ОЗ	$I_{c\Sigma} = 25A$	$I_{c\Sigma} = 50A$	$I_{c\Sigma} = 100A$	$I_{c\Sigma} = 250A$
	$S_{num.\Sigma} =$ 20...25 МВА	$S_{num.\Sigma} =$ 31,5...40 МВА	$S_{num.\Sigma} =$ 50...63 МВА	$S_{num.\Sigma} =$ 80...100 МВА
$I_{мин.5}, A$	0,2-0,23	0,56-0,65	1,55-1,78	4,73-5,44
$I_{мин.7}, A$	0,11-0,13	0,32-0,35	0,78-0,9	1,85-2,13
$I_{ВГ.мин.}, A$	0,23-0,26	0,7-0,74	1,73-1,99	5,02-5,84
$\alpha_{мин.} = I_{ВГ.мин.} / I_{c\Sigma}, \%$	0,92-1,04	1,4-1,48	1,73-1,99	2,01-2,34

Из данных, приведенных в таблицах 2.1.2 и 2.1.3 минимальный уровень ВГ в токе ОЗ в кабельных сетях 6-10 кВ имеет значение $I_{ВГ.мин.} \approx (0,92 - 2,8)\%$, в работах Кискачи В.М. данный параметр равен примерно $\square 2,7\%$, Жежеленко И.В. равен примерно $\square 1,9\%$. Для оценки полученных данных необходимо графическое сравнение данных в данной работе и в других работах. Исходя из сказанного для проведения сравнительного анализа полученных данных в работах Кискачи В.М. и Жежеленко И.В. и данных полученных с имитационной модели в программе MICROSOFT EXCEL были построены зависимости минимального уровня ВГ от полной емкости сети $I_{c\Sigma}$ (рисунок

2.1.4 и 2.1.5).

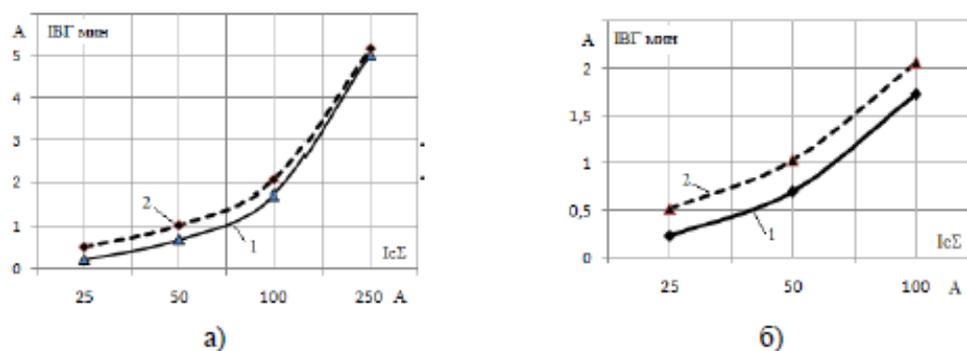


Рисунок 2.1.4 – Зависимость $I_{BG.min.} = f(I_{c\Sigma})$ (б – в увеличенном масштабе при малых значениях собственной емкости сети) 1 – по результатам расчетов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ; 2 – по данным, приведенным в работе Кискачи В.М.

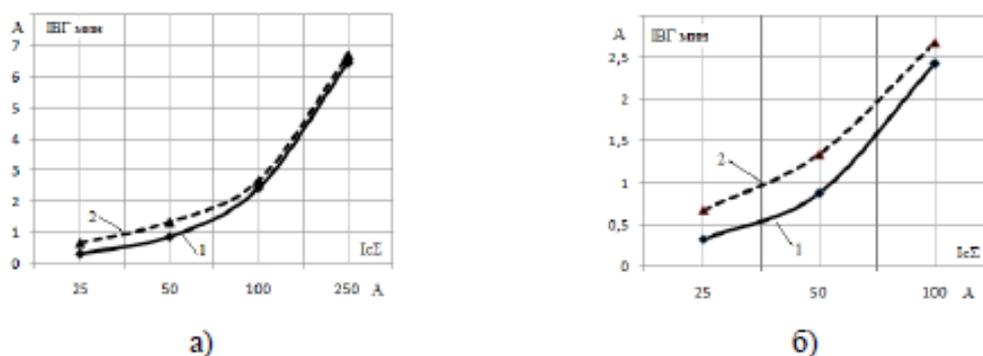


Рисунок 2.1.5 – Зависимость $I_{BG.min.} = f(I_{c\Sigma})$ (б – в увеличенном масштабе при малых значениях собственной емкости сети) 1 – по результатам расчетов на имитационных моделях кабельных сетей 6–10 кВ; 2 – по данным, приведенным в работе Жежеленко И.В.

Исходя из полученных данных (рисунок 2.1.4, 2.1.5), видно, что результаты в данной работе приближены к результатам реальных испытаний. Поэтому для определения требований чувствительности РЗ будем использовать результаты, полученные в данной работе. Поэтому минимальное содержание ВГ в токе ОЗ от емкостного тока сети можно принять $I_{BG.min.} \approx 0,01 \cdot I_{c\Sigma}$. Для защит на основе ВГ коэффициент чувствительности следует принимать 1,5-2,0. С учетом $I_{c\Sigma.min.} = 20A$ получим:

$$I_{с.з.мин.} = \frac{I_{ВГ.мин.}}{K_{ч.мин.}} = \frac{0,01 \cdot I_{с\sum .мин.}}{K_{ч.мин.}} = \frac{0,01 \cdot 20}{2} = 0,1А . \quad (2.1.1)$$

В реальных сетях значение содержания минимального уровня ВГ от общего емкостного тока сети немного больше выбранного значения. По данным работы «Токовая защита ЗГНП-4.2 от замыканий на землю в обмотке статора генератора, работающего на сборные шины» минимальный уровень ВГ в токе ОЗ составляет порядка 4%. Данный параметр в данной работе выше поскольку для каждой схемы необходимо учитывать электроприемники (источники ВГ) трансформаторы, ДГР, генераторы, электродвигатели.

2.2 Анализ максимального уровня ВГ в токе ОЗ в сетях 6-10 кВ

Используя коэффициенты несинусоидальности напряжения $K_{Un.макс} = 0,08$ из ГОСТ 32144-2013 и предельно допустимые коэффициенты гармонических составляющих $K_{Uv.пред}$ (5,7,11,13 гармоник) определяемых по формуле 2.2.1, произведем расчет:

$$K_{Uv.пред} = 1,5 \cdot K_{Uv.норм} . \quad (2.2.1)$$

Наибольший уровень ВГ в токе ОЗ i гармоник = 5,7,11,13 будет иметь место, если коэффициент несинусоидальности напряжения будет определяться только по указанным гармоникам. При этом для выполнения условия $K_{Un.макс} \leq 0,08$ необходимо принять $K_{U5.пред} \approx 5\%$, несколько меньше значения указанного в ГОСТ 32144-2013 (таблица 2.2.1).

Таблица 2.2.1 – Значения нормально и предельно допустимого коэффициентов несинусоидальности напряжения в диапазоне частот 650 Гц

Номер гармоники i	5	7	11	13
---------------------	---	---	----	----

$K_{Uv.пред}, \%$	4	3	2	2
$K_{Uv.норм}, \%$	6	4,5	3	3

Исходя из всего вышесказанного максимальный уровень ВГ в токе ОЗ будет равен:

$$\alpha_{\max} = K_{\text{Инс}\%} = 100 \cdot \sqrt{(5 \cdot K_{U5.пред})^2 + (7 \cdot K_{U7.пред})^2 + (11 \cdot K_{U11.пред})^2 + (13 \cdot K_{U13.пред})^2} \approx \quad (2.2.2)$$

$$\approx 65\%.$$

На основе практических измерений в кабельных сетях 6-10 кВ максимальный уровень ВГ может достигать 35% и более процентов. Исходя из вышесказанного можно отметить, что полученные расчетным путем значения максимального уровня ВГ в токе ОЗ являются возможно допустимыми.

2.3 Анализ факторов, влияющих на нестабильность уровня ВГ

2.3.1 Оценка общих факторов, влияющих на нестабильность ВГ

Степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ можно оценить, используя параметр Z приведенный в работе Кискачи В.М. «Селективность сигнализации замыканий на землю с использованием высших гармоник»:

$$Z = \frac{I_{v\Sigma_{\max}}}{I_{v\Sigma_{\min}}} = \frac{\alpha_{\max} \cdot I_{C\Sigma}}{\alpha_{\min} \cdot I_{C\Sigma}} = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}}, \quad (2.3.1)$$

где α_{\max} - максимальный уровень ВГ в токе ОЗ по отношению к емкостному току сети;

α_{\min} - минимальный уровень ВГ в токе ОЗ по отношению к емкостному току сети.

Факторы, влияющие на нестабильность уровня ВГ в токе ОЗ кабельных

сетей 6-10 кВ:

- 1) Нелинейная нагрузка (графики нагрузок);
- 2) Колебания напряжения сети;
- 3) Состав электроприемников питания.

Выше представленные три фактора оказывают наибольшее влияние на нестабильность уровня ВГ.

В таблице 2.3.1 представлены основные электроприемники (источники ВГ) по отраслям промышленности.

Таблица 2.3.1 – Состав нагрузки по отраслям промышленности

Отрасль промышленности	Состав электроприемников в процентном соотношении от общей нагрузки, %						
	СВ	АДН	АДВ	ЭО	ЭТУ	ЭСУ	ВП
Цветная металлургия	10	27,5	5	1,5	10	-	46
Химическая промышленность	35±7	29±8	15±6	2,4	3	1	12
Угледобывающая промышленность	4	67	7	15	-	-	7
Черная металлургия	25	29,5	8	2,5	22	3	10
Автомобилестроение	9	48	10	5	19	3	6
Машиностроение	8	52	5	5	13	14	3
Электротяга	-	5	-	5	-	-	90

где СД - синхронные двигатели, АДВ - асинхронные электродвигатели высоковольтные; АДН - асинхронные электродвигатели низковольтные; ЭО - электрическое освещение; ЭТУ - электротермические установки; ЭСУ - электросварочные установки; ВП - нелинейные (вентильные) преобразователи переменного тока в постоянный.

На нестабильность уровня ВГ так же оказывают суточные графики нагрузки. На рисунке 2.3.1. приведены суточные графики нагрузки для

рассматриваемых отраслей промышленности. Резкие изменения уровня ВГ следует наблюдать на предприятиях, работающих по 5 дневной схеме работы, с выходными днями суббота, воскресенье (черная металлургия, автомобилестроение). Стабильный уровень ВГ можно наблюдать на производствах с непрерывным технологическим процессом, когда требуется круглосуточная работа электроустановки (цветная металлургия, химическая промышленность).

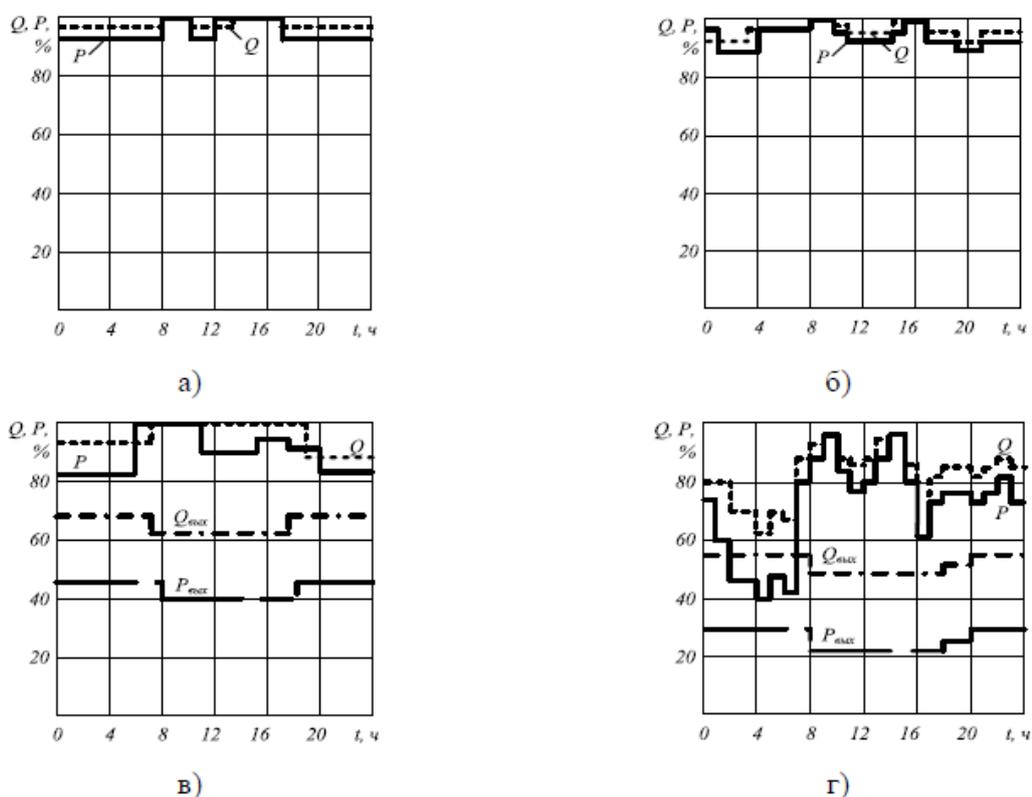


Рисунок 2.3.1 – Суточные графики по отраслям промышленности (а - цветная металлургия; б - химия; в - черная металлургия; г – автомобилестроение)

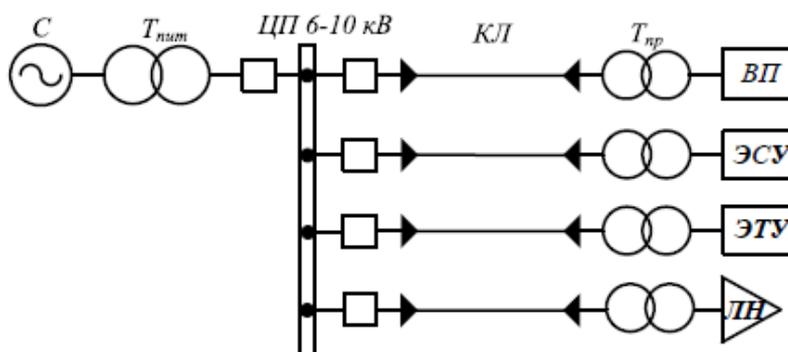
При оценке нестабильности уровня ВГ в токе нагрузки, потребляемыми ВП и ЭСУ, степень включения в нагрузку данных электропримеников принималась от 3 до 6 раз.

Исходя из технологического процесса сталеплавильных печей учитывалось, что существует разгрузка и загрузка металла, когда печь не является источником ВГ. Данный фактор учитывался при оценке нестабильности уровня ВГ.

Самая большая нестабильность уровня ВГ в токе ОЗ следует ожидать, на электротяговых подстанциях, в результате резко переменной и нелинейной нагрузки. Нестабильность уровня ВГ характерна для всех кабельных сетей питающих резко переменную и нелинейную нагрузку. К такой нагрузке можно отнести выпрямители, сталеплавильные печи и т.п. В таких сетях применение защит на основе ВГ, может вызвать неселективную работу.

2.3.2 Расчет колебаний общего уровня ВГ в токе ОЗ кабельных сетей 6-10 кВ

Типовая схема, использованная в модели для расчета нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ для различных отраслей промышленности представлена на рисунке 2.3.2.



2.3.2 – Схема электроснабжения кабельной сети 6-10 кВ для расчета нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ

Как видно из рисунка 2.3.2 для моделирования пунктов питания промышленных предприятий были выбраны нагрузки ВП, ЭСУ, ЭТУ и добавлена линейная нагрузка (ЛН). Данные нагрузки выбраны исходя из суточных графиков нагрузки и особенной технологического процесса производств.

Для расчета максимального уровня ВГ в токе ОЗ были приняты следующие допущения:

- 1) Предприятие с учетом технологического процесса и суточного графика нагрузки работает в максимальном режиме;

2) Основные источники ВГ (ВП, ЭСУ, ЭТУ) включены в нагрузку и дают максимальный уровень ВГ;

3) Напряжение на шинах подстанции равно $1,05U_{ном}$.

Для расчета минимального уровня ВГ в токе ОЗ были приняты следующие допущения:

1) Предприятие с учетом технологического процесса и суточного графика нагрузки работает в режиме минимальной нагрузки;

2) Источники ВГ используются меньше по мере уменьшения общей нагрузки;

3) ЭТУ полностью отключается при нагрузке меньше $0,5S$;

4) Минимальный уровень ВГ генерируемый от источников ВП и ЭСУ в 5-6 раз меньше;

5) Напряжение на шинах подстанции равно $U_{ном}$.

Параметры используемы для расчетов:

$$U_{ном} = 6кВ; I_{с\Sigma} = 25А; S_{итт.тр.} = 31,5МВА(63 / 2); K_{загр} = 0,7.$$

В таблице 2.3.2 приведены полученные данные моделирования расчета нестабильности уровня ВГ для гармоник в диапазоне до 650 Гц используемых в защитах на основе ВГ.

Таблица 2.3.2 – Расчетные нестабильности значения i -ой гармоники в токе ОЗ

Вид промышленности	Z_{ν}				
	$\nu = 5$	$\nu = 7$	$\nu = 11$	$\nu = 13$	Z_{Σ}
Цветная металлургия	3,36	2,77	1,25	0,85	2,01
Химическая промышленность	3,38	3,05	1,91	1,24	2,44

Черная металлургия	9,22	7,57	3,98	2,98	4,99
Автомобильная промышленность	11,1	8,61	4,9	2,59	5,87

Исходя из таблицы 2.3.1 и 2.3.2 можно сказать что высокая нестабильность уровня ВГ в токе ОЗ наблюдается на предприятиях с переменным режимом работы. Следует отметить, что полученные нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ выше рекомендуемых для расчета уставок и для оценки области применения защит на основе ВГ.

Полученные данные, для предприятий с постоянным графиком работы, нестабильности уровня ВГ в кабельных сетях 6-10 кВ, выше значения соответствующего рекомендуемым.

2.3.3 Аналитическая оценка нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ

Исходя из приведённых данных в главе 2.3.2 на уровень нестабильности ВГ в токе ОЗ оказывает нелинейная нагрузка. Для аналитической оценки степени нестабильности уровня ВГ в токах ОЗ кабельных сетей 6–10 кВ примем, что в составе комплексной нагрузки РП источниками ВГ являются силовые трансформаторы 6–10/0,4 кВ приемных подстанций и самая большая нелинейная нагрузка (ВП), что характерно для предприятий ряда отраслей промышленности (таблица 2.3.1). Максимальный и минимальный уровень ВГ i -гармоники в фазных токах и напряжениях, создаваемых выбранными источниками можно определить по формуле:

$$K_{U_{\text{вмакс}}} = \frac{U_{\text{вмакс}}}{U_{\text{ф.т}}} \approx \left| K_{U_{\text{вмакс}}}^{(T)} + K_{U_{\text{вмакс}}}^{(ВП)} \right| \approx K_{\text{ф}} \cdot (K_{U_{\text{вмакс}}}^{(T)} + K_{U_{\text{вмакс}}}^{(ВП)}); \quad (2.3.2)$$

$$K_{U_{\text{вмин}}} = \frac{U_{\text{вмин}}}{U_{\text{ф.т}}} \approx \left| K_{U_{\text{вмин}}}^{(T)} + K_{U_{\text{вмин}}}^{(ВП)} \right| \approx K_{\text{ф}} \cdot (K_{U_{\text{вмин}}}^{(T)} + K_{U_{\text{вмин}}}^{(ВП)}), \quad (2.3.3)$$

где $K_{U_{v, \max}}^{(T)}$, $K_{U_{v, \max}}^{(ВП)}$, $K_{U_{v, \min}}^{(T)}$, $K_{U_{v, \min}}^{(ВП)}$ - максимальный и минимальный уровень i -гармоники, генерируемых выбранными электроприемниками;

K_{ϕ} - коэффициент, учитывающий несовпадение гармоник генерируемых различных источников по фазе.

Исходя из работ Жежеленко И.В. принимаем $K_{\phi} \approx 0,7$.

Если известны максимальный и минимальный уровень ВГ, коэффициент Z степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ равен:

$$Z = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} = \frac{K_{I_{h, \max}}}{K_{I_{h, \min}}} = \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} (v \cdot K_{U_{v, \max}})^2}}{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} (v \cdot K_{U_{v, \min}})^2}}. \quad (2.3.4)$$

В результате моделирования было установлено, что нагрузка трансформаторов ТП и сопротивление кабельных линий, приводит к уменьшению максимального и минимального уровня ВГ в напряжениях, что не оказывает влияния на отношение $\alpha_{\max} \setminus \alpha_{\min}$ и следовательно данные факторы в аналитическом расчете можно не учитывать. Так же в расчетах было принято, что все трансформаторы имеют одинаковые характеристики, а значит и одинаковый ток холостого хода $I_{x,x} = 1.5-2\%$.

Относительный уровень i -гармоники напряжения на шинах РП, создаваемый током намагничивания можно определить по выражению:

$$K_{U_{v, \max}}^{(T)} = v \cdot \frac{I_{x,x, \%}}{100} \cdot \alpha_{v, \max}^{(T)} \cdot \frac{S_{\sum \text{ном}}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}; \quad (2.3.5)$$

$$K_{U_{v, \min}}^{(T)} = v \cdot \frac{I_{x,x, \%}}{100} \cdot \alpha_{v, \min}^{(T)} \cdot \frac{S_{\sum \text{ном}}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}, \quad (2.3.6)$$

где $S_{\sum \text{ном}}^{(T)} = \sum_i^n S_{i \text{ном}}^{(T)}$ - суммарная мощность всех трансформаторов на

приемных подстанциях, МВА;

$S_{\kappa}^{(3)}$ - мощность трехфазного короткого замыкания на шинах РП, МВА;

$\alpha_{\nu}^{(T)}$ - доля i -й гармоники в зарядном токе трансформаторов.

Для нелинейной нагрузки, в данном случае (вентильные преобразователи (ВП)), минимальный и максимальный уровень генерируемых гармоник на шинах РП можно определить по выражению:

$$K_{UV_{\max}}^{(ВП)} \approx \nu \cdot \alpha_{\nu_{\max}}^{(ВП)} \cdot \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{*_{\max}}^{(ВП)} \cdot S_{\sum_{\text{ном}}}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}; \quad (2.3.7)$$

$$K_{UV_{\min}}^{(ВП)} \approx \nu \cdot \alpha_{\nu_{\min}}^{(ВП)} \cdot \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{*_{\min}}^{(ВП)} \cdot S_{\sum_{\text{ном}}}^{(T)}}{S_{\kappa}^{(3)}}, \quad (2.3.8)$$

где $K_3^{(T)}$ - коэффициент загрузки трансформаторов;

$S_{*_{\max}}^{(ВП)}, S_{*_{\min}}^{(ВП)}$ - нелинейная нагрузка (ВП) в процентном соотношении от общей нагрузки $S_{\sum_{\text{ном}}}^{(T)}$.

Для силовых трансформаторов значения коэффициентов $\alpha_{\nu_{\max}}^{(T)}, \alpha_{\nu_{\min}}^{(T)}$ определяется исходя из напряжения на вводах и загруженности. При $K_3^{(T)} = 0,7$, для 5-й и 7-й гармоники значения $\alpha_{\nu_{\max}}^{(T)}, \alpha_{\nu_{\min}}^{(T)}$ с учетом таблицы 2.2 и 2.3 равны: $\alpha_{5_{\max}}^{(T)} = 0,137; \alpha_{7_{\max}}^{(T)} = 0,051; \alpha_{5_{\min}}^{(T)} = 0,079; \alpha_{7_{\min}}^{(T)} = 0,01$.

Для управляемых и неуправляемых ВП значения коэффициентов равны: $\alpha_{5_{\max}}^{(ВП)} = 0,2; \alpha_{7_{\max}}^{(ВП)} = 0,14; \alpha_{11_{\max}}^{(ВП)} = 0,02; \alpha_{13_{\max}}^{(ВП)} = 0,01$. С учетом кривых генерируемых ВП гармоник приведенных в трудах Жежеленко И.В., при углах управления $\alpha \leq 30^0$ и угле коммутации γ до 40^0 принимаем значения коэффициентов $\alpha_{\nu_{\min}}^{(ВП)}: \alpha_{5_{\min}}^{(ВП)} \approx 0,12; \alpha_{7_{\min}}^{(ВП)} \approx 0,04; \alpha_{11_{\min}}^{(ВП)} \approx 0,02; \alpha_{13_{\min}}^{(ВП)} \approx 0,01$.

Исходя из данных полученных по формуле 2.3.7 и 2.3.8 и 2.3.4 произведем расчет по выражению 2.3.9:

$$\begin{aligned}
Z = \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\min}} = \frac{K_{\text{In.макс}}}{K_{\text{In.мин}}} &= \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} K_{\phi}^2 \left(v \cdot \frac{I_{x.x,\%}}{100} \cdot \alpha_{v.\max}^{(T)} \cdot \frac{S_{\sum_{\text{ном}}^{(T)}}}{S_{\kappa}^{(3)}} + v \cdot \alpha_{v.\max}^{(ВП)} \cdot \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{*.\max}^{(ВП)} \cdot S_{\sum_{\text{ном}}^{(T)}}}{S_{\kappa}^{(3)}} \right)^2}}{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} K_{\phi}^2 \left(v \cdot \frac{I_{x.x,\%}}{100} \cdot \alpha_{v.\min}^{(T)} \cdot \frac{S_{\sum_{\text{ном}}^{(T)}}}{S_{\kappa}^{(3)}} + v \cdot \alpha_{v.\min}^{(ВП)} \cdot \frac{K_3^{(T)} \cdot S_{*.\min}^{(ВП)} \cdot S_{\sum_{\text{ном}}^{(T)}}}{S_{\kappa}^{(3)}} \right)^2}} = \\
&= \frac{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} \left(v \cdot \frac{I_{x.x,\%}}{100} \cdot \alpha_{v.\max}^{(T)} + v \cdot \alpha_{v.\max}^{(ВП)} \cdot S_{*.\max}^{(ВП)} \right)^2}}{\sqrt{\sum_{v=5}^{13} \left(v \cdot \frac{I_{x.x,\%}}{100} \cdot \alpha_{v.\min}^{(T)} + v \cdot \alpha_{v.\min}^{(ВП)} \cdot S_{*.\min}^{(ВП)} \right)^2}}.
\end{aligned} \tag{2.3.9}$$

Представленным выше способом аналитическим способом можно учитывать все электроприемники являющиеся нагрузкой, то есть не только трансформаторы и ВП, а ЭСУ, ЭТУ и т.п. Учитывая все электроприемники и особенности технологического процесса можно повысить точность аналитической оценки нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ.

По выражению 2.3.9 были произведены расчеты для рассматриваемых выше отраслей промышленности в том числе и для городских сетей с коммунально-бытовой нагрузкой. Все результаты сведены в таблицу 2.3.3.

Таблица 2.3.3 – Результаты аналитической оценки нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ для различных отраслей промышленности

	$I_{x.x,\%}$	$K_3, \text{о.е.}$	$S_{*.\max}^{(ВП)}, \text{о.е}$	$S_{*.\min}^{(ВП)}, \text{о.е}$	$Z, \text{о.е}$
Цветная металлургия	2	0,7	0,46	0,46	2,01
Химическая промышленность	2	0,7	0,12	0,12	1,95
Черная металлургия	2	0,7	0,1	0,04	4,04
Автомобильная промышленность	2	0,7	0,06	0,015	4,66
Электротяговые подстанции	2	0,7	0,9	0,09	17,57
Коммунально-бытовая нагрузка	2	0,7	0,1	0	7,51

Сравнив результаты, полученные на имитационных моделях таблица 2.3.2 и полученные аналитическим путем данные 2.3.3, можно сделать вывод что данные отличаются не более чем на 15-20 %, что является приемлемым для приближенных расчетов.

В таблице 2.3.3 приведены результаты аналитических расчетов для тяговых подстанции и для коммунально-бытовой нагрузки. Для тяговых подстанций с учетом технологического процесса было принято допущение что максимальная и минимальная нагрузки отличаются в 10 раз.

Приведенные результаты показывают высокую нестабильность уровня ВГ в токе ОЗ тяговых подстанций, обусловленных наличием множества нелинейных источников и особенностями технологического процесса. Следовательно, для всех отраслей промышленности с высокой долей нагрузки нелинейных потребителей в общей нагрузке, следует ожидать высокую степень нестабильности уровня ВГ в токе ОЗ.

Для коммунально-бытовой нагрузки, было принято, что нелинейная нагрузка, а именно доля ВП в составе общей нагрузки составляет 5% от общей нагрузки. В максимальном режиме ВП составляет 5% от общей нагрузки, а в минимальном отсутствует (в ночное время). Следует отметить, что при отсутствии в общей нагрузке ВП (ночное время), наблюдается достаточно высокая нестабильность уровня ВГ в токе ОЗ.

2.4. Модели кабельных сетей для исследования высших гармонических составляющих в токах ОЗ при переходных процессах

В предыдущей главе 2.3 мы рассмотрели колебания уровня ВГ без учета переходных процессов, а именно в установившемся режиме. Важным фактором для защиты является распознавание вида ОЗ и максимальное быстроедействие, с учетом требуемой селективности. Исходя из вышесказанного необходимо рассмотреть переходной процесс возникновения и развития ОЗ.

Для исследования переходных процессов при ОЗ использовалось программное расширение программы MATLAB – «SIMULINK». Для расчёта

необходимых параметров, используемых в имитационной модели, использовались аналитические методы.

2.4.1 Модели кабельных городских и промышленных сетей электроснабжения для исследования переходных процессов при ОЗ

Для учета множества факторов, используя функциональные возможности, при создании модели кабельной сети 6-10 кВ была выбрана программа MATLAB. Для создания модели была выбрана типовая схема городского и промышленного электроснабжения. На рисунках 2.4.1 и 2.4.2 представлены модели кабельных сетей ЦП, РП городского и промышленного электроснабжения.

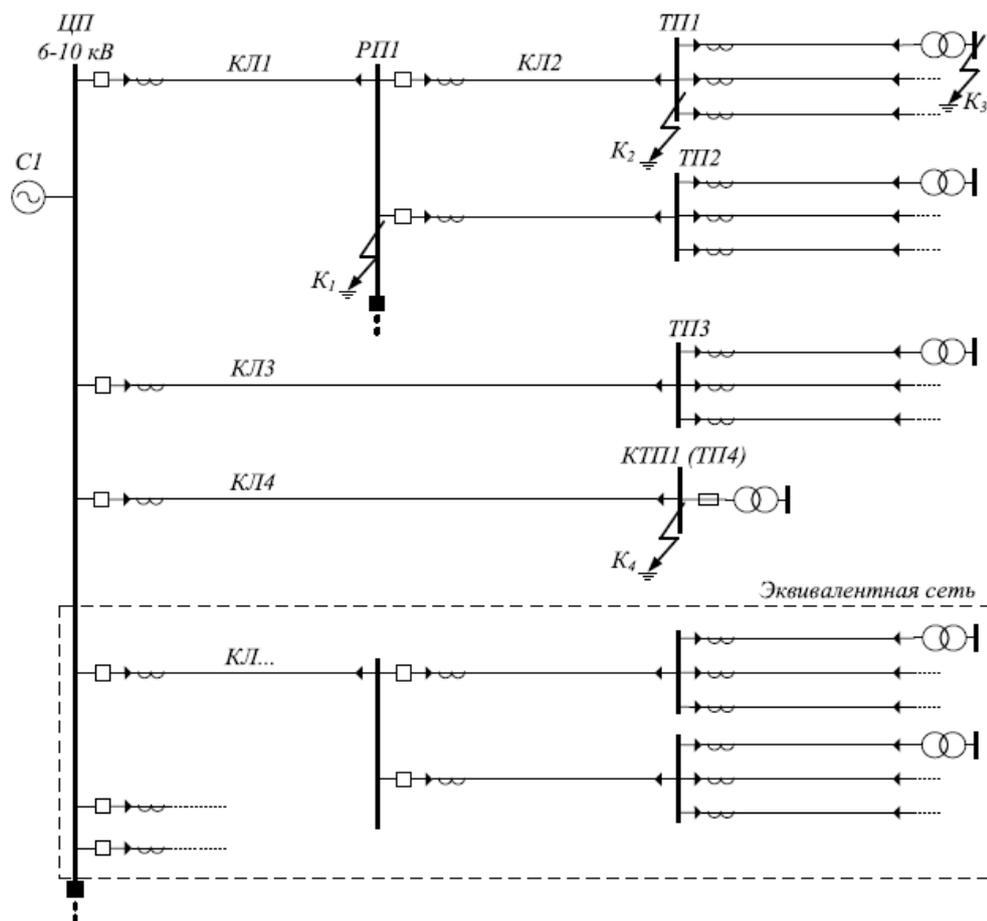


Рисунок 2.4.1 – Типовая схема модели кабельной сети 6-10 кВ промышленного электроснабжения и принцип ее преобразования

Для полноты модели и использования всех факторов можно создать модель РП на основе ГРУ ТЭЦ 6-10 кВ, с учетом всех источников,

подключенных к шинам РП. Однако моделирование в математической среде занимает большое количество времени и требует больших вычислительных мощностей, в результате того, что на каждом шаге интегрирования происходит вычисление алгебраических уравнений большого порядка.

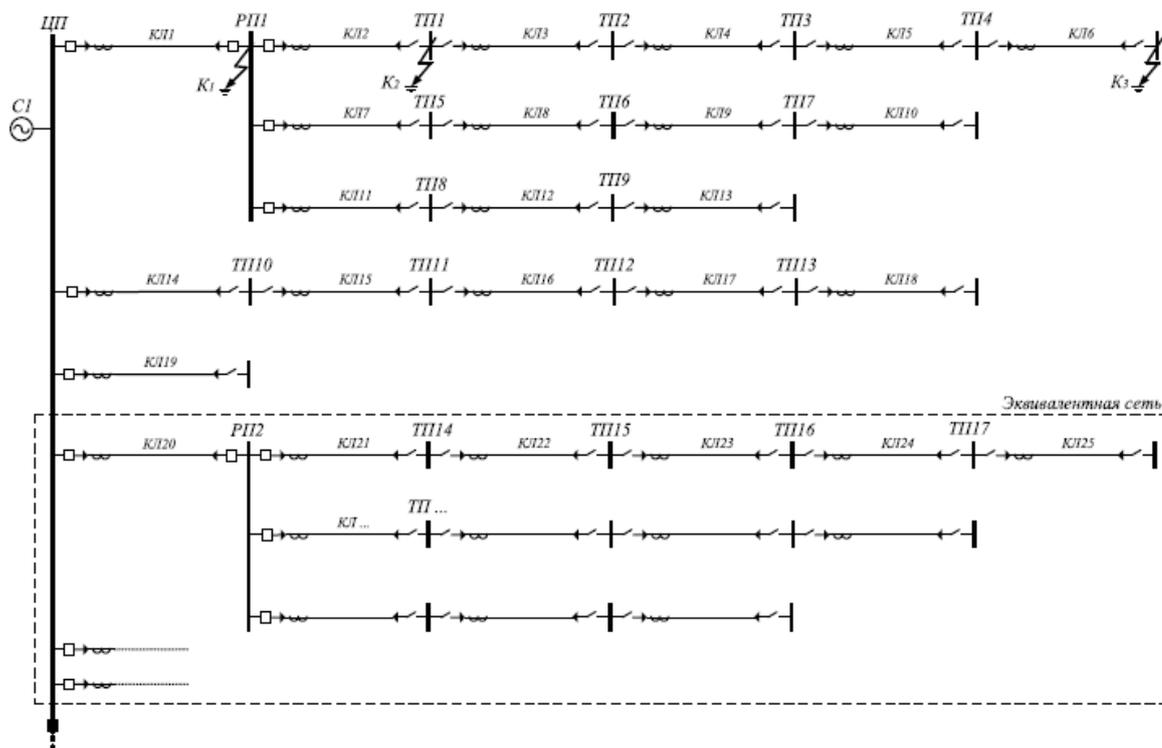


Рисунок 2.4.2 – Типовая схема модели кабельной сети 6-10 кВ городского электроснабжения и принцип ее преобразования

В работах Алексеева В.Г. говорится, что без потерь в точности результатов разрядной и зарядной составляющих переходных токов нулевой последовательности в месте ОЗ, в поврежденном и неповрежденных присоединениях и переходного напряжения нулевой последовательности можно использовать эквивалентную схему, в которой учтены только поврежденное и неповрежденное присоединения, а вся остальная часть сети представлена упрощенной эквивалентной схемой замещения. На рисунках 2.4.1 и 2.4.2 место преобразования обозначено пунктиром. Исходя из вышесказанного все расчеты частотных характеристик и зависимостей переходных процессов при ОЗ, производились с учетом преобразования элементов схемы замещения.

2.4.2 Аналитический метод определения параметров кабельных линий 6-10 кВ для исследования переходных процессов

Для моделирования кабельных линий в программе MATLAB в среде SIMULINK существует специализированный блок Distributed Parameters Line, в котором учитываются такие параметры как погонная индуктивность, активное сопротивление и емкостное сопротивление прямой и нулевой последовательности. В блоке Distributed Parameters Line не предусмотрена возможность построения зависимостей распределенных параметров (индуктивность, активное сопротивление) от частоты переходного тока.

Однако изучено, что в переходных характеристиках тока и напряжения можно выделить две основные частотные составляющие: зарядную и разрядную, что соответствует двум стадиям переходного процесса в сетях 6-10 кВ. В исследованиях Шуин В.А. показано, что частоты разрядных составляющих в основном определяются индуктивностью от шин РП до места возникновения ОЗ. Частота разрядной составляющей в основном зависит от индуктивности источника питания. С учетом вышесказанного необходимо задать начальные параметры для того, чтобы максимально смоделировать разрядный переходной процесс. Для того чтобы обеспечить это требование в модели кабельной линии, необходимо определить индуктивность прямой и нулевой последовательности через скорость распространения электромагнитных волн в соответствующих контурах:

$$L_1 \approx \frac{1}{v_1^2 \cdot C_1}; \quad (2.4.1)$$

$$L_0 \approx \frac{1}{v_0^2 \cdot C_0}, \quad (2.4.3)$$

где $C_1 = C_{\text{раб}} = C_{0.l} + 3 \cdot C_{\text{мл}}$; $C_0 = C_{0.l}$ - емкость для составляющих прямой и нулевой последовательности;

v_1, v_0 - скорость распространения волн в прямой последовательности

(канал «фаза-фаза») и нулевой последовательности (канал «фаза-земля»).

В исследовании Шалыт Г.М. для кабельных линий 6-10 кВ указывается что волновое сопротивление для прямой и нулевой последовательности приблизительно равно: $v_1 \approx v_0 = 150-160 \text{ м / мкс}$.

Сложно учитывать зависимость частотной составляющей от активного сопротивления. Поэтому активное сопротивление было подобрано таким способом, чтобы обеспечить время затухания колебательного процесса разрядной и зарядной составляющей переходного тока максимально приближенно ко времени затухания в существующих кабельных сетях 6-10 кВ. В исследованиях Лихачева Ф.А. и Шуин В.А. полное затухание зарядных колебаний происходит через 3-5 мс, разрядных через 0,1-1 мс.

2.4.3 Анализ соотношений мгновенных значений переходных токов в поврежденных и неповрежденных присоединениях при ОЗ в кабельных сетях 6–10 кВ влияющих на селективность и устойчивость релейной защиты

Исследования проводились на моделях, представленных на рисунках 2.4.1 и 2.4.2. На модели во время исследования изменялись такие факторы как : место ОЗ(на шинах и на самом удаленном электроприемнике), способ заземления нейтрали и параметры кабельных линий. Во всех точках ОЗ фиксировались такие параметры как расчетные осциллограммы переходного тока, переходные токи в неповрежденных участках цепи и переходные напряжения нулевой последовательности.

В результате были получены осциллограммы, из которых можно сделать вывод, что допущения, которые основываются на исследовании произведенные еще в 60-х годах не всегда имеют место быть. В соответствие с исследованиями было принято, что переходный ток в месте ОЗ распределяется между неповрежденными присоединениями пропорционально их емкостям фаз на землю. Соответственно, совпадение по форме переходных токов нулевой последовательности в поврежденных и неповрежденных присоединениях в

кабельных сетях 6–10 кВ из-за больших значений амплитуд разрядных составляющих не всегда соответствует действительности.

Наибольшее влияние разрядная составляющая оказывает влияние на переходной ток нулевой последовательности при приближении к источнику питания (точка К1) с учетом емкостного тока сети. То есть при увеличении сопротивления (удаленные точки) влияние разрядной составляющей уменьшается. Полученные осциллограммы представлены на рисунке 2.4.3 и 2.4.4.

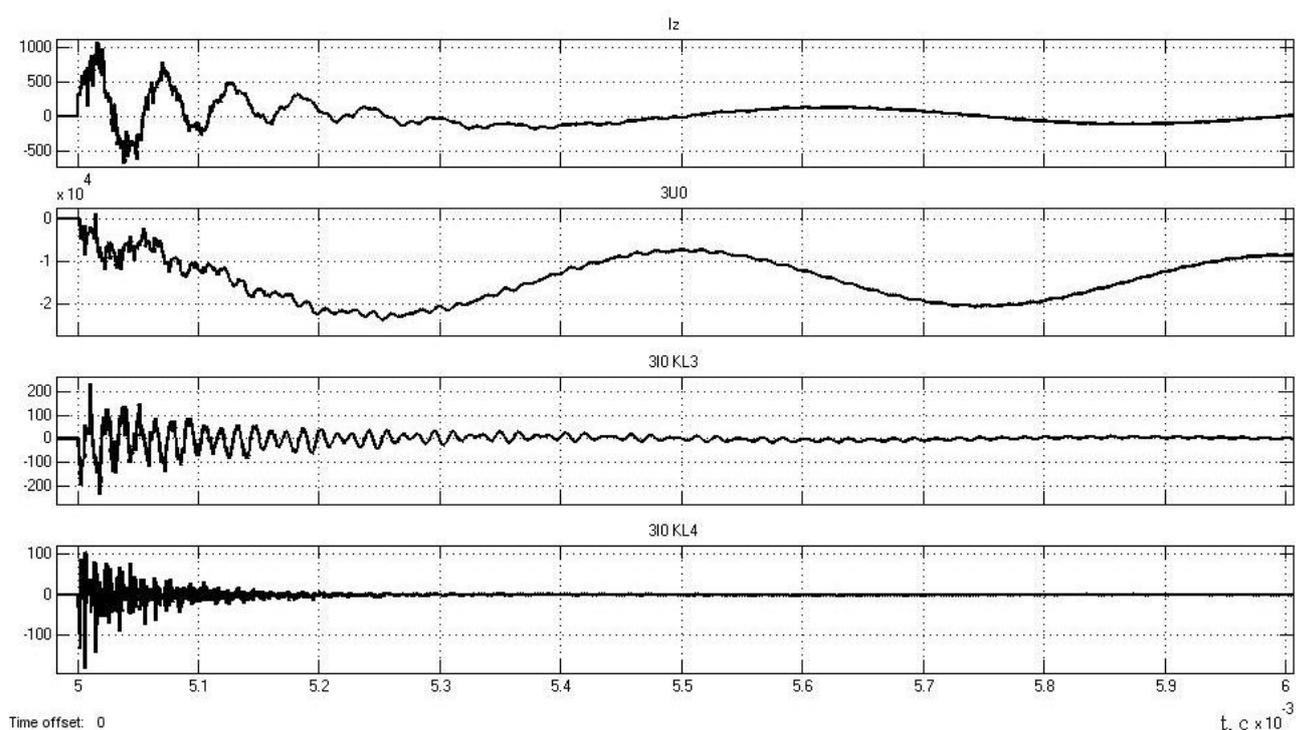


Рисунок 2.4.3 – Расчетные осциллограммы тока в месте повреждения I_z , напряжения нулевой последовательности на шинах $3U_0$, токов в неповрежденных линиях $3I_{0kl3}$ и $3I_{0kl4}$ (кабельные линии К3 и К4)

На рисунке 2.4.3 представленные осциллограммы сетей промышленного электроснабжения с номинальными параметрами: $I_{c\Sigma} = 5A$; $U_{ном} = 6кВ$; I_z – ток в месте ОЗ; $L_{кл3} = 300$ м – длина кабельной линии 3; $L_{кл4} = 30$ м – длина кабельной линии 4.

На рисунке 2.4.4 представленные осциллограммы сетей промышленного электроснабжения с номинальными параметрами: $I_{c\Sigma} = 30A$; $U_{ном} = 6кВ$; I_z – ток в

месте ОЗ; $L_{кЛ3} = 500$ м – длина кабельной линии 3; $L_{кЛ4} = 100$ м – длина кабельной линии 4.

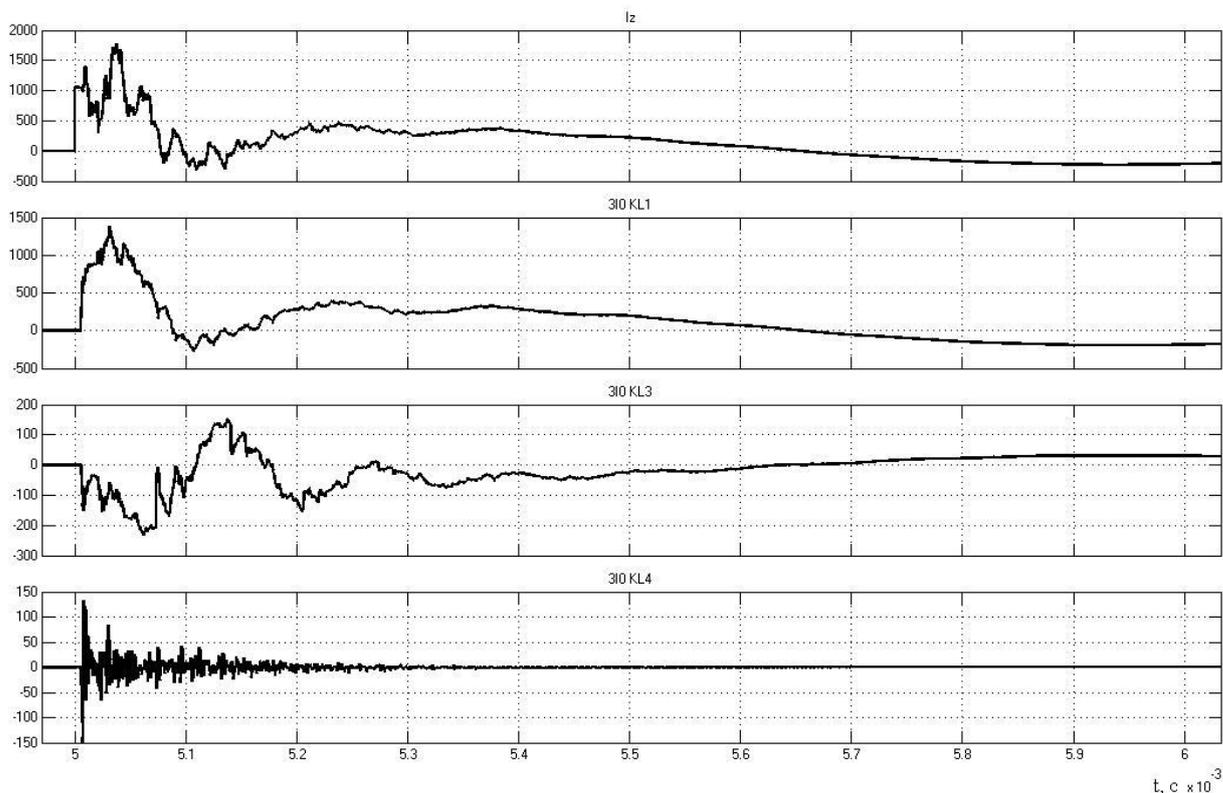


Рисунок 2.4.4 – Расчетные осциллограммы тока в месте повреждения I_z , напряжения нулевой последовательности на шинах $3U_0$, токов в неповрежденных линиях $3I_{0кЛ3}$ и $3I_{0кЛ4}$ (кабельные линии К3 и К4)

Как видно из рисунков 2.4.3 и 2.4.4 разрядные составляющие оказывают существенное влияние на форму и соотношения токов нулевой последовательности на поврежденных и неповрежденных участках сети, даже при удаленном ОЗ. Проанализировав полученные осциллограммы, можно сказать что разрядная составляющая переходного тока в неповрежденных линиях имеет многочастотный характер. Однако в месте ОЗ и на поврежденном участке наблюдается малочастотная разрядная составляющая в токе нулевой последовательности.

Рассмотрев полученные формы переходного тока $3I_0$ в поврежденном и неповрежденном соединении, можно сделать вывод, что построить направленную защиту на основе полных токов ОЗ на всем интервале времени существования переходного процесса в общем случае не предоставляется

возможным. Для построения направленной защиты нулевой последовательности необходимо создать условие, чтобы переходной ток в месте ОЗ распределялся между неповрежденными участками пропорционально их емкостям фаз на землю.

Следует учитывать, что многочастотный характер разрядных составляющих переходного тока в неповрежденных участках, создает трудности для использования направленной защиты на основе импульсного принципа действия с фиксацией начального момента фазных соотношений фазных величин в момент ОЗ. Из осциллограмм, представленных выше следует, что при малых длинах защищаемых кабельных линий фиксация начальных фазных соотношений первых полуволн переходного тока в момент ОЗ, должна осуществляться в первые микросекунды возникновения ОЗ. Осуществить технически фиксацию на первых микросекундах возникновения ОЗ невозможно, в результате погрешностей ТТНП и фиксирующего органа.

2.4.4 Анализ частотного спектра в поврежденных и неповрежденных кабельных линиях на напряжение 6-10 кВ при возникновении ОЗ

Для создания условий применимости, отстройки, направленной защиты необходимо провести амплитудно-частотный анализ тока нулевой последовательности в момент возникновения ОЗ в поврежденных и неповрежденных кабельных линиях. Кроме описанных выше условий необходимо создать условие для измерительной части защиты тока и напряжения, а также для фильтрации рабочего диапазона частот.

Для спектрограмм переходных токов нулевой последовательности неповрежденных линий в момент возникновения ОЗ характерно наличие нескольких высокочастотных пиков, подтверждающих явно выраженный многочастотный характер разрядной составляющей (рисунок 2.4.5).

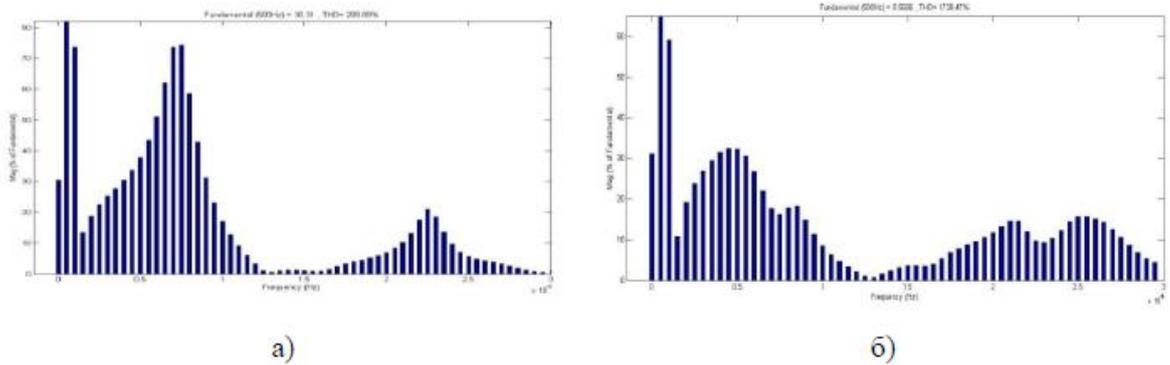


Рисунок 2.4.5 – Спектрограмма переходных токов неповрежденных кабельных линиях КЛЗ (а) и КЛ4 (б) в момент возникновения ОЗ в точке К1 промышленного электроснабжения с номинальными параметрами: $U_{ном} = 6кВ$; $I_{c\Sigma} = 30А$

На основе анализа из рисунка 2.4.5 в переходном токе нулевой последовательности наблюдается многочастотный характер разрядной составляющей и наличие в разрядном токе поврежденного присоединения, кроме одной преобладающей (основной) частотной составляющей, также и других высокочастотных составляющих.

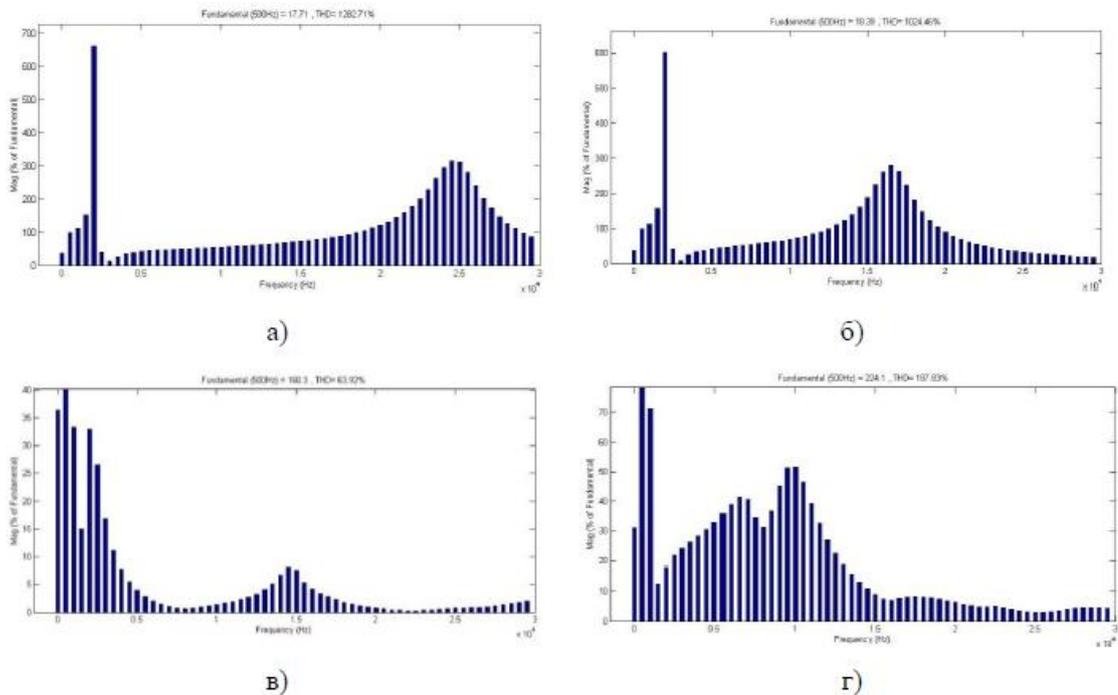


Рисунок 2.4.6 – Спектрограмма переходных токов поврежденных кабельных линий в момент возникновения ОЗ промышленного электроснабжения (рисунок 2.4.1) $U_{ном} = 6кВ$ с номинальными параметрами :а) $I_{c\Sigma} = 5А$; в точке К4; б) $I_{c\Sigma} = 5А$; в точке К5; в) $I_{c\Sigma} = 30А$; в точке К4; г) $I_{c\Sigma} = 30А$; в точке К5.

Из полученных данных (рисунок 2.4.6) можно сделать вывод, что при малых значениях емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ в результате простой конфигурации, переходной ток в месте ОЗ, кроме зарядной составляющей, имеющей наименьшую частоту колебаний, можно видеть, выраженную одну частотную разрядную составляющую. При этом следует отметить что разрядная частотная составляющая может достигать десятков килогерц (рисунок 2.4.6 (б)).

При больших значениях емкостного тока сети, в результате сложной конфигурации, имеет многочастотную выраженную разрядную составляющую, кроме основной разрядной составляющей в переходном токе ОЗ, можно видеть и другие разрядные составляющие имеющие в несколько раз меньшую амплитуду, чем основная (рисунок 2.4.6 в-г).

Из всего выше сказанного можно сделать вывод, что при увеличении емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ и удаление от места питания (в нашем случае от шин РП) место возникновения ОЗ, частотный спектр разрядной составляющей уменьшается. Но следует учитывать, что, если рассмотреть модель W. Petersen или модель J.F. Peters, J. Slepian, существует множество факторов, влияющих на частотный спектр ОЗ. Такие факторы как длительность горения и условия гашения дуги могут иметь случайный характер и создавать множество других факторов случайного характера, которые трудно учесть при моделировании.

2.5 Анализ влияния режима заземления нейтрали на возникновение и переходных процессов, протекающих при ОЗ

В иностранных трудах указано: «Глухо заземленная нейтраль в отличие от изолированной системы заземления, имеет большой ток замыкания на землю. Характеристики тока замыкания на землю зависят от метода заземления нейтрали» [3].

Однако данное условие описанное выше характерно для установившегося режима, а в данной работе рассматривается переходной режим в момент ОЗ. Во

многих исследованиях и трудах, посвященных исследованиям переходных процессов при ОЗ, видно, что заземление через высокоомный резистор практически не влияет на фазные соотношения переходных токов и напряжений нулевой последовательности. Для обоснования представленных выше допущений необходимо провести исследование на модели кабельных линий 6-10 кВ использованных в главе 2.4.1 (рисунок 2.4.1). Исследование влияния заземления нейтрали на переходные процессы при ОЗ является важной задачей поскольку является фактором не имеющей конкретной привязки.

Анализ влияния режима заземления нейтрали проводился путем сравнения полученных осциллограмм переходного тока в месте ОЗ. Сравнение проводилось в поврежденных и неповрежденных присоединениях, путем сравнения переходных параметров сети с изолированной с аналогичным режимом заземления нейтрали использующимся в данной сети (рисунок 2.5.1 и 2.5.2).

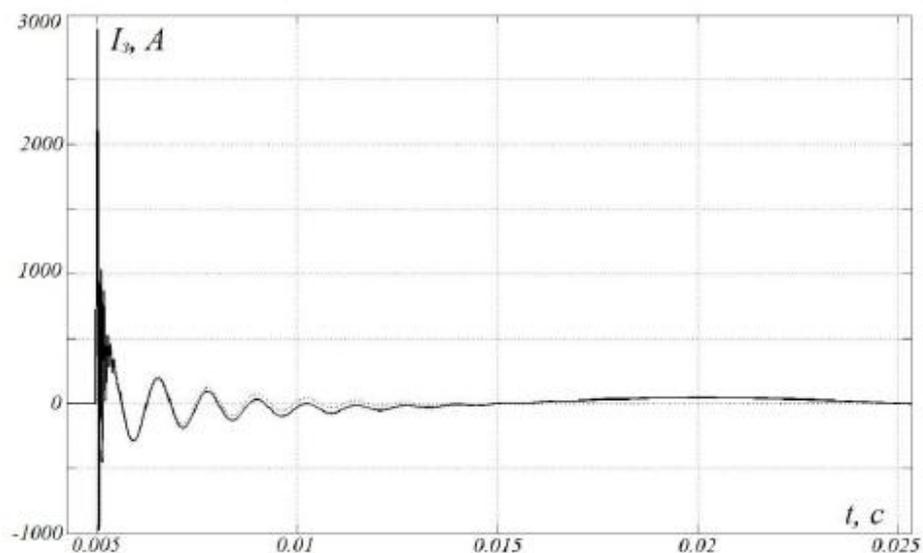


Рисунок 2.5.1 – Осциллограммы переходного тока в месте ОЗ для сети промышленного электроснабжения ($U_{ном} = 6кВ; I_{c\Sigma} = 30А$) с изолированной нейтралью (сплошная линия) и с заземлением нейтрали через ДГР(штрих-пунктирная линия)

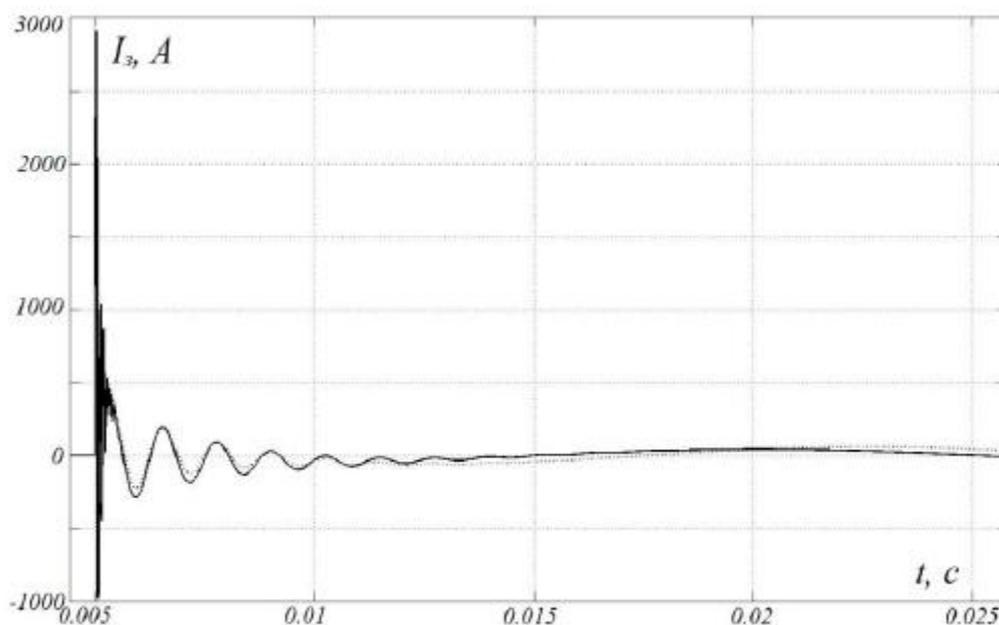


Рисунок 2.5.2 – Осциллограммы переходного тока в месте ОЗ для сети промышленного электроснабжения ($U_{ном} = 6кВ; I_{c\Sigma} = 5А$) с изолированной нейтралью (сплошная линия) и с заземлением нейтрали через высокоомный резистор (штрих-пунктирная линия)

Исследование проводилось путем моделирования возникновения ОЗ сети промышленного электроснабжения в точке К1 рисунок 2.4.1. Как видно из осциллограмм представленных на рисунках 2.5.1 и 2.5.2 заземление через ДГР, через высокоомный резистор или комбинированное заземление через ДГР с шунтирующим резистором не оказывают существенного влияния на переходной ток в месте ОЗ и в поврежденном участке сети.

Так же следует отметить, что компенсированная нейтраль не оказывает существенное влияние на переходные токи и напряжения нулевой последовательности в неповрежденных участках сети.

Существенное влияние режим заземления нейтрали оказывает на напряжения нулевой последовательности при гашении дуги в момент возникновения ОЗ через перемежающуюся дугу. Данный фактор должен учитываться при применение направленных защит нулевой последовательности.

2.6 Зависимость изменения рабочего диапазона частот от общей емкости сети в момент возникновения ОЗ

2.6.1 Анализ диапазона изменения частот, основных составляющих тока переходного процесса при ОЗ

Для аналитической оценки частот разрядной и зарядной составляющей воспользуемся моделью, представленной в исследованиях Шуина, В.А. В работе Шуин, В.А., представлена модель двухчастотной схемы замещения, учитывающая множество факторов линий и влияние разрядной и зарядной составляющей. Модель разработана на основе исследований, проведенных на физической модели существующей кабельной сети 6-10 кВ. Рассматриваемая схема замещения физической модели кабельной сети 6-10 кВ представлена на рисунке 2.6.1.

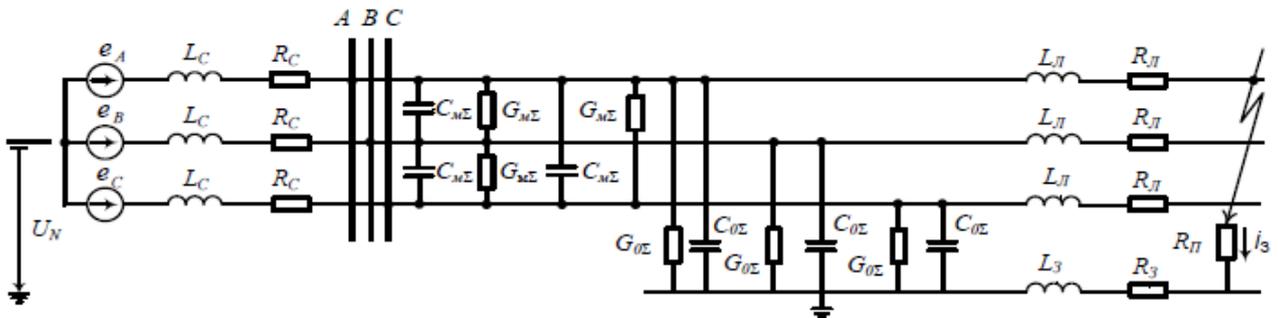


Рисунок 2.6.1 – Двух частотная схема замещения физической модели кабельной сети 6-10 кВ

Для рассматриваемой схемы замещения по рисунку 2.6.1 частоты основной разрядной f_p и зарядной f_3 составляющих определяются по формулам:

$$f_p \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{k_c \cdot \omega_1^2 + \omega_2^2 + \sqrt{k_c^2 \cdot \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2 \cdot k_c - 4) \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}}; \quad (2.6.1)$$

$$f_3 \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{k_c \cdot \omega_1^2 + \omega_2^2 - \sqrt{k_c^2 \cdot \omega_1^4 + \omega_2^4 + (2 \cdot k_c - 4) \cdot \omega_1^2 \cdot \omega_2^2}}, \quad (2.6.2)$$

где $\omega_1^2 = \frac{1}{(L_n + 3L_s) \cdot C_{0\Sigma}}$ - угловая частота переходного тока;

$\omega_2^2 = \frac{1}{L_u \cdot (C_{0\Sigma} + 3C_{M\Sigma})} = \frac{1}{L_u \cdot C_{раб.\Sigma}}$ - угловая частота переходного тока;

$k_c = \frac{1 + 2 \cdot C_{0\Sigma}}{C_{раб.\Sigma}}$ - коэффициент изменения емкости зарядных и разрядных

составляющих.

Для кабелей на напряжение 6-10 кВ отношение рабочей емкости к начальной емкости сети равно $C_{раб.\Sigma} \setminus C_{0\Sigma} = 1,5 \dots 1,85$. Как видно данное соотношение изменяется в очень малых пределах, поэтому $\omega_1^2, \omega_2^2, k_c$ величины зависят от суммарной емкости сети, индуктивности поврежденного участка сети от шин до места ОЗ и индуктивности источника питания L_u .

Индуктивность источника питания определяется по формуле через ток трехфазного короткого замыкания по формуле:

$$L_u = \frac{U_{ф.ном}}{\omega \cdot I_k^{(3)}}, \quad (2.6.3)$$

где $U_{ф.ном}$ - номинальное фазное напряжение;

$I_k^{(3)}$ - ток трехфазного короткого замыкания.

На рисунке 2.6.2 построены зависимости частот основной зарядной и разрядной составляющих переходного тока и напряжения нулевой последовательности от суммарного емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$. Зависимость построена при различных удалениях от места ОЗ.

Номинальные параметры, использованные для расчетов:

$$U_{ном} = 6 \text{ кВ};$$

$$I_k^{(3)} = 10 \text{ кА}.$$

Поврежденные линии выполнены кабелем ВБбШв 3х240.

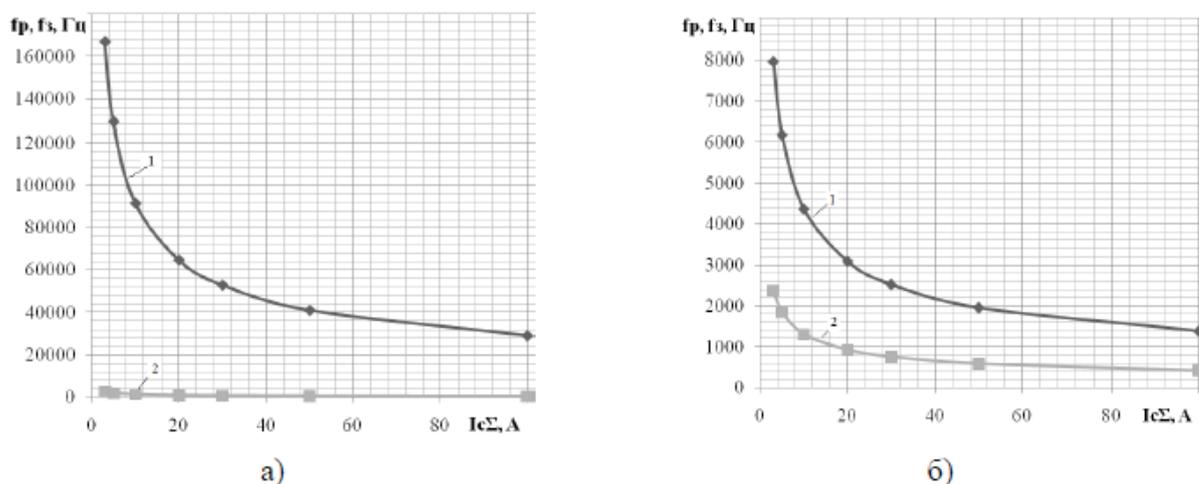


Рисунок 2.6.2 – Зависимость частоты разрядных и зарядных составляющих от емкостного тока сети при различных удалениях от шин ЦП (а- $l_3=0,01$ км; б- $l_3=5$ км)

Из представленных зависимостей на рисунке 2.6.2 можно сделать вывод, что частота разрядных колебаний в зависимости от факторов (изменение удаления места ОЗ и д.р.) может изменяться в пределах от сотен Гц до сотен кГц. Частота зарядной составляющей изменяется в тех же пределах что и разрядная от сотен Гц до сотен кГц в зависимости от факторов, влияющих на частоту.

Обеспечение селективной и устойчивой работы направленных устройств защиты при ОЗ в представленном выше диапазоне технически невозможно, поэтому необходимо рассмотреть вопрос фильтрации верхнего рабочего предела частот. На практике необходимо подавление высокочастотных составляющих разрядной составляющей тока нулевой последовательности.

2.6.2 Анализ влияния фильтрации высокочастотных составляющих на потери в сигнале переходного тока

Как отмечалось в главе 2.6.1 для обеспечения селективной и устойчивой работы необходима фильтрация высокочастотных составляющих при переходном процессе в момент возникновения ОЗ. В данной главе рассмотрен вопрос фильтрации сигнала переходного тока в момент ОЗ.

Общая оценка при ОЗ частотного спектра переходного тока может быть

получена в диапазоне частот в котором сосредоточена основная часть энергии сигнала. Из спектрограмм, приведенных на рисунках 2.4.5 и 2.4.6 можно видеть, что часть энергии, пропорциональная переходным токам при ОЗ сосредоточена в верхней части спектра. Поэтому фильтрация энергии в высокочастотном спектре приведет к потере входного полезного сигнала и к уменьшению чувствительности устройств защиты от ОЗ на основе переходных процессов.

Условие, при котором мы получаем высокочастотный пик в спектре возникает при ОЗ вблизи шин и минимальной длительности броска переходного тока, то есть при гашении дуги при первом переходе через ноль по модели дугового прерывистого ОЗ W. Petersen. Поэтому фильтрация при указанных условиях создаст максимальные потери полезного входного сигнала.

Влияние фильтрации высокочастотных составляющих было исследовано на модели представленной на рисунке 2.4.1. Исследование проводилось при разных значениях емкостного тока сети равное 5А и 30А.

Необходимо оценить какой процент полезного сигнала будет потерян в результате фильтрации высокочастотных составляющих тока нулевой последовательности. Для оценки потерь мощности полезного сигнала тока момент ОЗ в поврежденном и неповрежденном присоединение было произведено пропускание сигнала через фильтр низких частот (ФНЧ) с изменяемой частотой среза f_c и с возможностью задать верхнюю частоту рабочего диапазона защиты. Потери полезного сигнала оценивались отношением:

$$E_* = \frac{E_\phi}{E} = \frac{\int_0^{t_{c,\phi}} (3 \cdot i_{0,\phi})^2 \cdot dt}{\int_0^{t_c} (3 \cdot i_0)^2 \cdot dt}, \quad (2.6.4)$$

где E_* - относительно значение энергии сигнала на выходе ФНЧ;

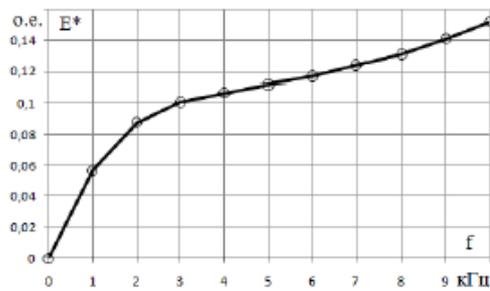
E - энергия первичного броска тока в момент ОЗ;

E_{ϕ} - энергия броска переходного тока на выходе ФНЧ;

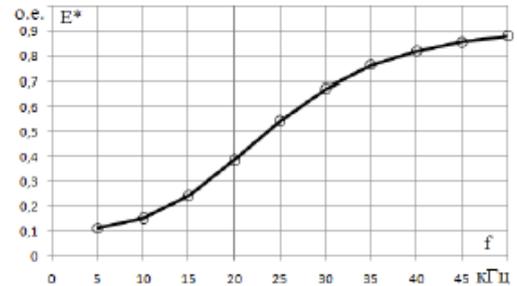
$t_{c,\phi}$ - длительность броска переходного тока на выходе ФНЧ;

t_c - длительность броска первичного переходного тока.

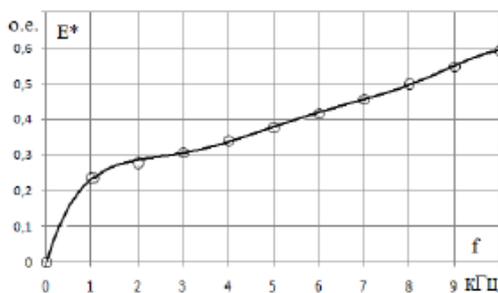
На рисунке 2.6.3 представлены полученные данные оценки высокочастотной фильтрации броска тока в момент ОЗ. На рисунке 2.6.3 представлена зависимость высокочастотной фильтрации на относительное значение энергии сигнала.



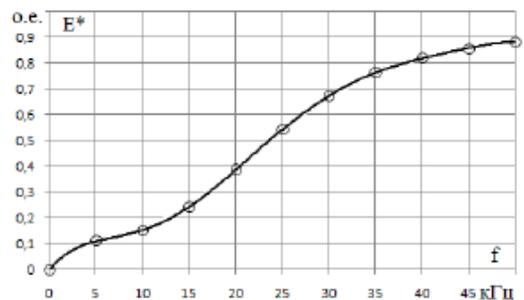
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.6.3 – Зависимость энергии броска переходного тока на выходе ФНЧ в момент ОЗ от верхней частоты рабочего диапазона устройств защиты а),б) - ОЗ вблизи шин с $I_{c\Sigma} = 5A$; в),г) – ОЗ вблизи шин с $I_{c\Sigma} = 30A$.

Из зависимостей, представленных на рисунках 2.6.3 можно сделать вывод, что высокочастотная фильтрация приводит к уменьшению энергии входного сигнала переходного тока, особенно, это заметно в сетях с малым емкостным током $I_{c\Sigma} = 5A$. К примеру в сетях с малым емкостным током сети $I_{c\Sigma} = 5A$ ограничение верхней частоты рабочего диапазона защиты на основе

переходных процессов значением $f_c = 3\text{кГц}$, приводит к уменьшению энергии входного сигнала в 10 раз (рисунок 2.6.3 а)). Так же следует отметить уменьшение энергии входного сигнала ведет к значительному изменению амплитуды, а именно к её уменьшению. На рисунке 2.6.4 представлена зависимость изменения формы сигнала от верхней частоты рабочего диапазона защиты.

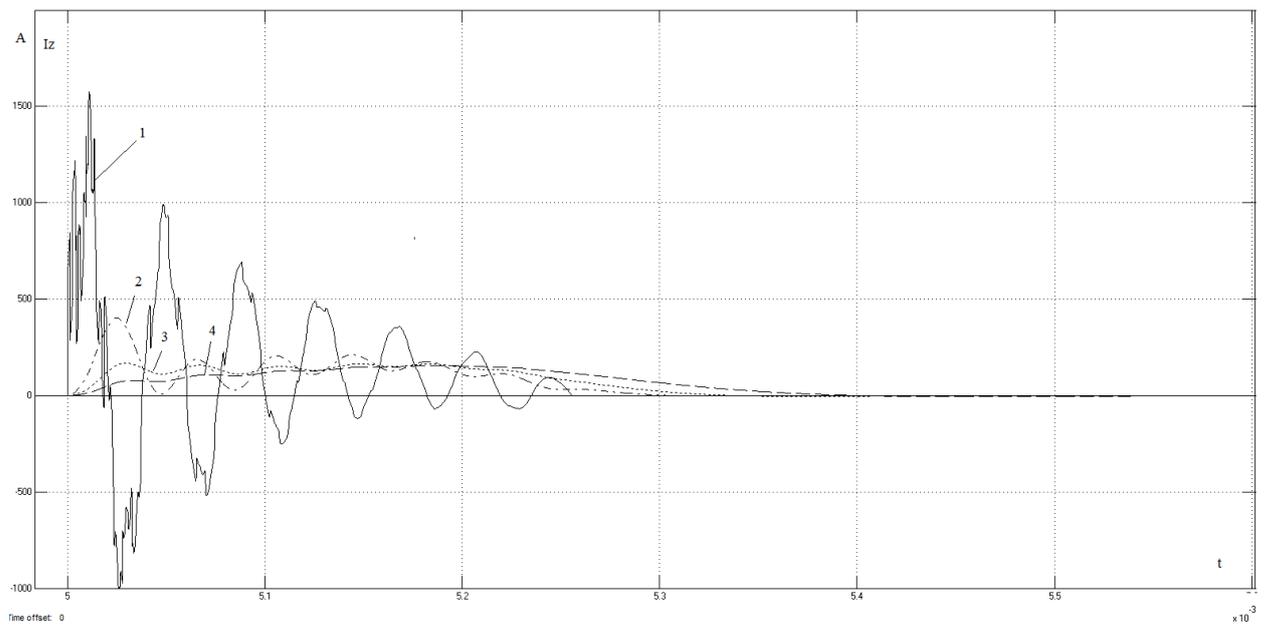


Рисунок 2.6.4 – Зависимость форму и амплитуды переходного тока при высокочастотной фильтрации: 1) - сигнал без фильтрации при ОЗ на шинах $I_{c\Sigma} = 5\text{А}$; 2) – сигнал на выходе ФНЧ с $f_c = 10\text{кГц}$; 3) - сигнал на выходе ФНЧ с $f_c = 5\text{кГц}$; 4)– сигнал на выходе ФНЧ с $f_c = 3\text{кГц}$

Как видно из данных представленных на рисунках 2.6.3 и 2.6.4 с увеличением емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$ и смещением частотного спектра в область более низких частот влияние фильтрации на чувствительность защиты по первичному току уменьшается (рисунок 2.6.3 в),г)). Следует отметить что уменьшение энергии входного сигнала и изменение его амплитуды и формы в результате фильтрации высокочастотных составляющих должно учитываться при обосновании рабочего диапазона частот и требований к чувствительности направленной защиты от ОЗ при переходных процессах.

Если рассмотреть данные представленные на рисунке 2.6.3 необходимо отметить что, при ОЗ на шинах ЦП в сетях с малыми значениями $I_{c\Sigma}$ при ограничение спектра частот до 5 кГц сосредоточено около 10% энергии броска переходного тока. При увеличение $I_{c\Sigma}$ до десятков ампер, энергия сосредоточенная в указанной области возрастает но все равно не достигает 50%.

Полученные данные в данной работе и в других исследованиях имеют схожие параметры лишь в том случае, когда данный фактор рассматривался с использованием современных систем моделирования.

2.7 Анализ распознавания дуговых прерывистых коротких замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ с учетом заземления нейтрали

2.7.1 Область применения распознавания дуговых прерывистых замыканий на землю в кабельных сетях 6-10 кВ

Как было сказано в главе 1 и в главе 2, короткие замыкания через перемежающуюся дугу в сетях 6-10 кВ, сопровождаются многократными перенапряжениями и ведут к разрушению электроприемников, поэтому данный вид короткого замыкания необходимо отключать и действие на сигнал не допустимо.

Задача распознавания вида короткого замыкания является основной. В результате необходимо автоматическое распознавание вида короткого замыкания и степени опасности для защищаемой сети. Данная задача особо актуальна в сетях с изолированной нейтралью, поскольку в данной сети высока вероятность дугового прерывистого замыкания и вследствие возникновения опасных перенапряжений.

В компенсированных сетях при настройке ДГР (близко к резонансной), повторные зажигания дуги в момент ОЗ, возможны только после практически полного стекания дополнительно заряда с емкости фаз на землю, т.е. после

гашения дуги (среднее время стекания составляет 200 мс). Исходя из вышесказанного и на основе исследований, изложенных в трудах Шуин, В.А. «Расчет перенапряжений при дуговых прерывистых замыканиях на землю. Зависимость от режима заземления нейтрали.» перенапряжения при повторных зажиганиях дуги с учетом настройки ДГР, не превышают перенапряжений при первичном пробое изоляции. Перенапряжения порядка $K_n = U_{\text{макс}} / U_{\text{ф.ном}} \approx 2,2 - 2,4$ не представляют особой опасности для сети, поскольку оборудование рассчитано на перенапряжения порядка $K_n \approx 3 - 5$.

В реальных сетях обеспечить благоприятную резонансную настройку ДГР удастся не всегда. В иностранных источниках отмечается: «В более старых установках используется старый реактор с ручной системой компенсации. В этих системах условие настройки изменяется с конфигурацией распределительной сети». [4] Исходя из сказанного можно сделать вывод что обеспечить 100% настройку практически невозможно.

К примеру, при расстройке компенсации более 15%, гашение дуги ОЗ сопровождается процессом нарастания напряжения на поврежденной фазе, и создает благоприятные условия для возникновения многократных пробоев изоляции через относительно небольшие интервалы времени. В результате многократного пробоя изоляции возникают высокие кратности перенапряжений при гашении дуги. Поэтому в реальных сетях с учетом условий эксплуатации необходимо контролировать возникновение опасных ОЗ.

Следует отметить, что в сетях с высокоомным заземлением нейтрали и с заземление через ДГР с шунтирующим резистором, перенапряжения при повторных зажиганиях дуги не превышают кратность первоначального пробоя изоляции $K_n = U_{\text{макс}} / U_{\text{ф.ном}} \approx 2,2 - 2,4$. В плане ограничения дуговых прерывистых замыканий заземление через высокоомный резистор и ДГР с шунтирующим резистором является более эффективным, чем компенсация емкостных токов.

Для высокоомного заземления нейтрали решается проблема перенапряжений. Некоторые исследователи предложили использовать

инкрементное напряжение нулевой последовательности для повышения чувствительности распознавания короткого замыкания [7]. Однако данный подход не эффективен вследствие решения проблемы перенапряжений.

Как было сказано выше при решении проблемы перенапряжений с помощью изменения заземления нейтрали, нет необходимости в контроле возникновения опасных дуговых коротких замыканий в сетях 6-10 кВ.

2.7.2 Прямой способ контроля дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ

Основным критерием опасности перенапряжений является его кратность, т.е. во сколько раз происходит превышение номинального напряжения. Расчетное значение в различных работах кратности перенапряжений в неповрежденном присоединении составляет $K_n \approx 2,4 - 2,5$.

Поэтому верхний предел измерений и распознавания опасного ОЗ будет:

$$\text{-для сети 6 кВ} = U_{\text{пер.макс}} \geq \frac{2,5 \cdot 1,05 \cdot 6,0 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 13 \text{ кВ}; \quad (2.7.1)$$

$$\text{-для сети 10 кВ} = U_{\text{пер.макс}} \geq \frac{2,5 \cdot 1,05 \cdot 10,0 \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 21 \text{ кВ}. \quad (2.7.2)$$

Недостатком прямого способа является необходимость подведения всех напряжений со всех участков цепи (по отдельности), что приведет к усложнению конфигурации сети и схемы защиты. Так же необходимо создать орган, который будет контролировать все участки цепи на предмет возникновения опасных ОЗ.

2.7.3 Косвенный способ контроля дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ

Установлено, что при увеличении времени между повторными зажиганиями дуги кратность перенапряжений K_n падает. Исходя из вышесказанного необходимо установить предельную зависимость времени между повторными зажиганиями дуги Δt в момент ОЗ и опасной кратности перенапряжений $K_n \approx 2,7$. Для этого необходимо провести моделирование дугового прерывистого замыкания способом описанным выше на существующих (типовых) схемах кабельных сетей с учетом емкостного тока сети как основополагающего фактора, влияющего на разрядные и зарядные стадии дугового процесса.

Произведенные на имитационных моделях (рисунок 2.4.1 и 2.4.2) исследования с изолированной нейтралью, показали, что с различными значениями емкостного тока сети $I_{c\Sigma}$, максимальные кратности перенапряжений не превышают допустимых при повторных зажиганиях дуги в момент ОЗ при $\Delta t \geq 90-100$ мс. Зависимость представлена на рисунке 2.7.1.

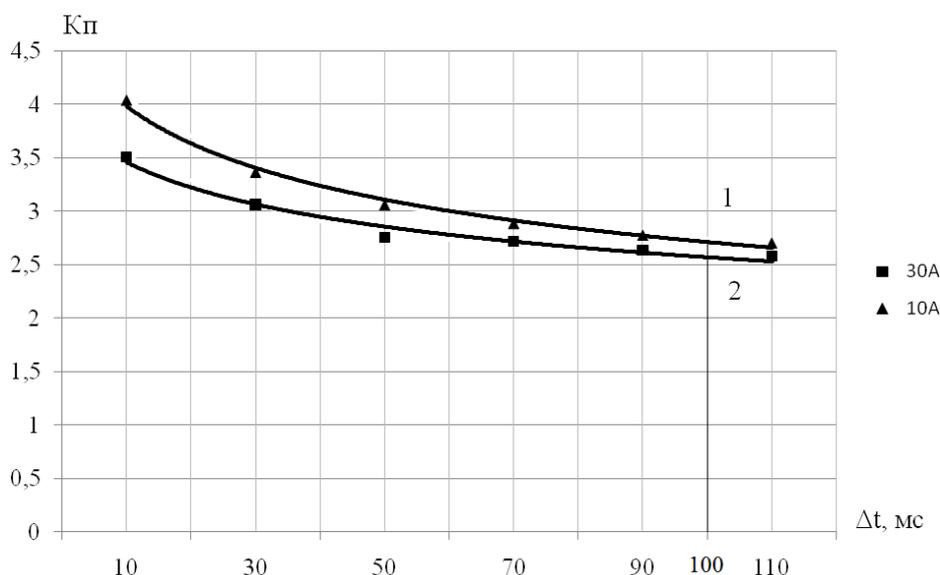


Рисунок 2.7.1 – Зависимость кратности максимальных перенапряжений от интервала между повторными зажиганиями дуги в момент ОЗ : 1) - для сети 6 кВ с $I_{c\Sigma} = 10A$; 2) - для сети 6 кВ с $I_{c\Sigma} = 30A$.

Исходя из данных представленных на рисунке 2.7.1, для кабельных сетей 6-10 кВ, работающих с изолированной нейтралью косвенным признаком возникновения опасного дугового прерывистого ОЗ является время между повторными зажиганиями дуги менее $\Delta t \leq 100 \text{ мс}$.

2.7.4 Анализ методики косвенного способа распознавания дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ

Как было сказано выше восстановление напряжения после гашения дуги имеет отличие в зависимости от типа заземления нейтрали. Пример восстановления напряжения с изолированной и компенсированной нейтралью представлен на рисунке 2.7.2.

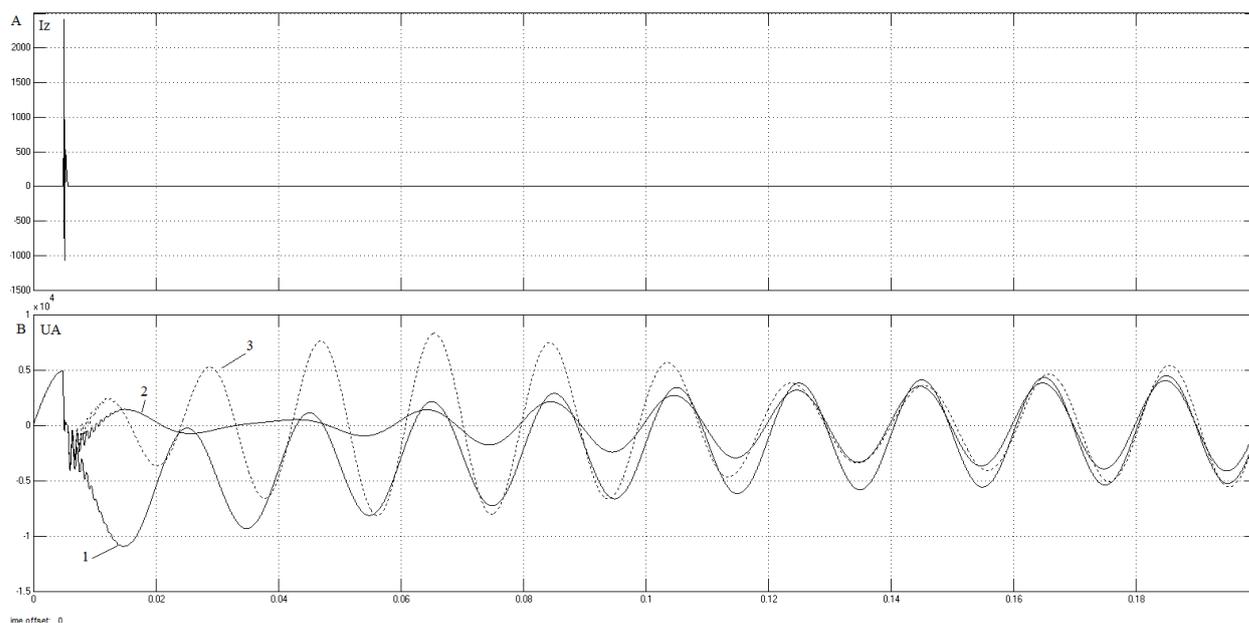


Рисунок 2.7.2 – Форма кривой восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги при ОЗ в кабельной сети с $U_{ном} = 6 \text{ кВ}$; $I_{c\Sigma} = 30 \text{ А}$:

- 1) – изолированная нейтраль; 2) – заземление через ДГР; 3) – заземление через ДГР при перекомпенсации (25%)

Исходя из осциллограмм, представленных на рисунке 2.7.2, можно отметить, что при перекомпенсации (кривая 3) восстанавливающее напряжение

на поврежденной фазе достигает предельного максимума, равного или превышающего номинальное напряжение. Интервал времени повторного зажигания дуги при перекомпенсации составляет $\Delta t \approx 25 - 35 \text{ мс}$, что значительно выше чем при изолированной нейтрали и значительно меньше чем при резонансной или близкой к ней настройке ДГР.

Особенностью восстанавливающего напряжения при перекомпенсации является возникновение после первого пика (кривая 3), еще 2-3 пиков превышающих первый. Следует отметить что возникновение повторного пробоя — это случайный хаотический процесс со множеством независимых факторов. Как правильно повторный пробой возникает на 1-м пике восстанавливающего напряжения, хотя физически пробой может произойти и на 2-м и на 3-м пике восстанавливающего напряжения. Исследование и впоследствии анализ на имитационных моделях (рисунок 2.4.1 и рисунок 2.4.2) показал, что повторные пробои изоляции возникают на 2-м и 3-м пике восстанавливающего напряжения. Зависимость кратности перенапряжений от времени зажигания между повторными пробоями изоляции представлена в таблице 2.7.1.

Таблица 2.7.1 – Зависимость кратности перенапряжений от времени зажигания между повторными пробоями изоляции и степени расстройки в кабельных сетях 6-10 кВ

	Значения $\Delta t_{\text{макс}}$ и $K_{\text{п.макс}}$ при расстройке компенсации ν , %										
	Перекомпенсация					Резонанс	Недокомпенсация				
	-25	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+15	+20	+25
$\Delta t_{\text{макс}}$, мс	□□ 50	□□ 70	□□ 110	□□ 150	□□ 200	>200	□□ 190	□□ 90	□□ 50	□□ 50	□□ 50
$K_{\text{п.макс}}$, о.е	3	2,9	2,7	2,5	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4	2,5	2,7
$\Delta t_{\text{мин}}$, мс	□□ 25	□□ 30	□□ 50	□□ 70	□□ 200	>200	□□ 190	□□ 70	□□ 50	□□ 30	□□ 30
$K_{\text{п.мин}}$, о.е	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,4

где $\Delta t_{\text{макс}}$ - время между повторными пробоями изоляции сопровождающееся максимальными перенапряжениями, мс;

$K_{\text{п.макс}}$ - максимальная кратность перенапряжений соответствующая $\Delta t_{\text{макс}}$;

$\Delta t_{\text{мин}}$ - время после гашения дуги соответствующее первому пику восстанавливающего напряжения кратному или превышающему номинальное, мс;

$K_{\text{п.мин}}$ - кратность перенапряжений соответствующая $\Delta t_{\text{мин}}$.

Исходя из данных в таблице 2.7.1 можно сделать вывод, что опасные перенапряжения могут возникнуть при расстройке компенсации выше 15%. При одинаковой расстройке перенапряжения в режиме перекомпенсации в разы больше чем в режиме недокомпенсации. В соответствии с «Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации» допускается длительная работа сети с перекомпенсацией и кратковременная с недокомпенсацией. В результате вышесказанного для рассмотрения целесообразно выбрать режим перекомпенсации.

На рисунке 2.6.7 построена зависимость кратности перенапряжений от интервалов времени между повторными пробоями изоляции для рассматриваемого режима перекомпенсации до -25%.

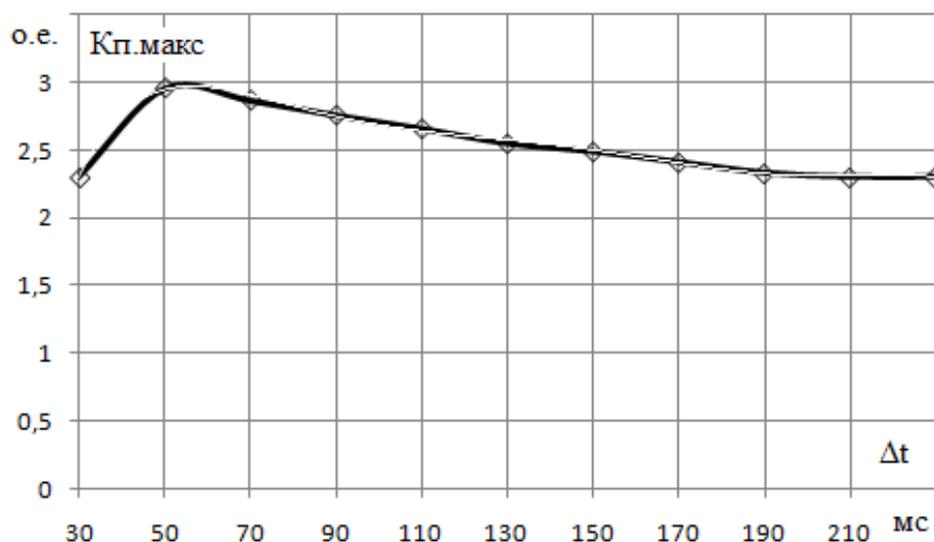


Рисунок 2.7.3 – Зависимость кратности перенапряжений $K_{\text{п.макс}}$ от интервалов времени между повторными пробоями изоляции $\Delta t_{\text{макс}}$ для режима

перекомпенсации

Из данных полученных путем моделирования (таблица 2.7.1) при расстройках компенсации менее 15% (0 исключаем) , опасные напряжения могут возникать при интервалах времени между повторными пробоями изоляции порядка $\Delta t \approx 50...90 \text{ мс}$. Величина перенапряжений зависит от двух основных факторов: интервалов времени между повторными пробоями изоляции и степени расстройки компенсации ДГР. Контроль интервалов времени между повторными пробоями изоляции, не рассматриваем сети с изолированной нейтралью, не является однозначным признаком возникновения перенапряжений, а является лишь косвенным признаком возникновения перенапряжений. Поскольку данный параметр не может точно показать вид короткого замыкания, а может лишь предупредить о возможном возникновении перенапряжения, необходимо использовать данную возможность для действия на сигнал, чтоб устранить возникающие перенапряжения физическим способом.

2.7.5 Анализ косвенного способа распознавания дуговых прерывистых замыканий на землю в компенсированных и некомпенсированных кабельных сетях 6-10 кВ, путем контроля общего уровня ВГ в переходном токе нулевой последовательности

Рассмотрев различные труды и исследования был выбран самый оптимальный для изучения способ распознавания ОЗ.

Как было сказано выше и рассчитано аналитическим путем, предельный уровень ВГ в токе ОЗ составляет $\square 65$ от $I_{c\Sigma}$. Следует отметить что исследования проводимые в реальных кабельных сетях показали, что предельный уровень ВГ в токе ОЗ составляет $\square 30-40$ от $I_{c\Sigma}$. Анализы исследований проведенных на моделях кабельных сетей 6-10кВ (рисунок 2.4.1 и 2.4.2) показал, что в момент ОЗ общий уровень ВГ значительно превышает предельный уровень ВГ. Следовательно (глава 2.7.3) общий уровень ВГ в токе

ОЗ в основном зависит от Δt (интервалы времени между повторными пробоями изоляции). Зависимость содержания высших гармонических составляющих в токе ОЗ от интервалов между повторными пробоями изоляции представлена в таблице 2.7.2.

Таблица 2.7.2 – Зависимость среднеквадратичного содержания высших гармонических в токе ОЗ от интервалов между повторными пробоями изоляции

$I_{c\Sigma} = 5A$										
Δt , мс	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$I_{BG} / I_{c\Sigma}$, о.е.	18,90	10,47	5,19	4,62	2,25	1,90	1,53	1,31	1,06	1
$I_{c\Sigma} = 30A$										
Δt , мс	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$I_{BG} / I_{c\Sigma}$, о.е.	11,40	5,96	3,02	2,61	1,47	1,02	0,96	0,79	0,62	0,6

Для более детального изучения построена функция по данным представленным в таблице 2.7.2, зависимости среднеквадратичного содержания высших гармонических в токе ОЗ от интервалов между повторными пробоями изоляции $I_{BG}^* = I_{BG} / I_{c\Sigma} = f(\Delta t)$.

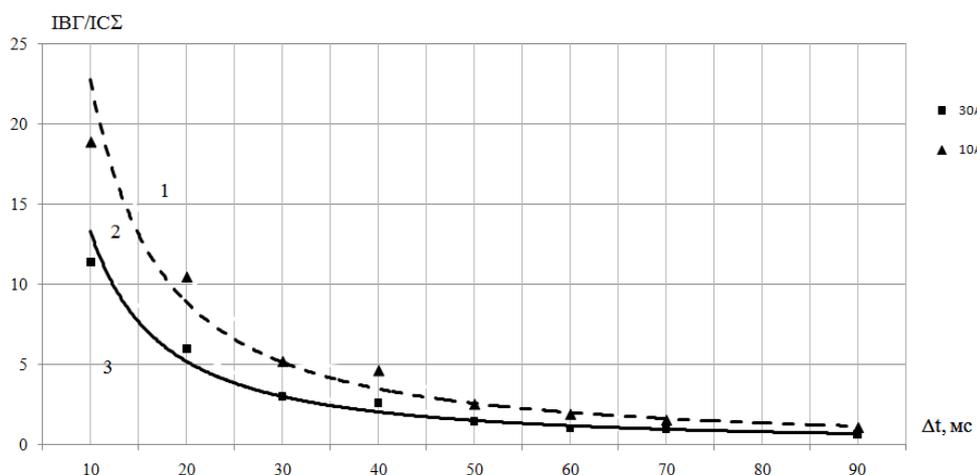


Рисунок 2.7.4 - Зависимость среднеквадратичного содержания ВГ в токе ОЗ от интервалов между повторными пробоями изоляции $I_{BG}^* = I_{BG} / I_{c\Sigma} = f(\Delta t)$;

$$1) - I_{c\Sigma} = 10A; 2) - I_{c\Sigma} = 30A.$$

Исходя из графического отображения зависимости представленной на рисунке 2.7.4 можно видеть что при больших значениях между повторными пробоями изоляции Δt , среднеквадратичное значение ВГ в токе ОЗ приблизительно равно общему емкостному току сети $I_{c\Sigma}$. Следует отметить что в токе нулевой последовательности неповрежденных присоединений отношение $I_{ВГ} / I_{C_{\text{общ}}}$ приблизительно равно $I_{ВГ} / I_{c\Sigma}$ в месте ОЗ.

Следовательно, для определения вида короткого замыкания (устойчивое или неустойчивое) необходимо контролировать общий уровень ВГ в токе ОЗ $3I_0$ защищаемого участка сети.

Выводы по главе 2

В данной главе было проведено исследование переходных процессов при ОЗ с учетом влияния различных параметров. В главе 2.1 была проведена оценка достоверности и точности результатов моделирования в программе SIMULINKMATLAB с исследованиями, проведенными в существующих кабельных системах.

В главе 2.2 – 2.3 было проведено имитационное моделирование нестабильности уровня ВГ и установлена зависимость данного параметра с основными параметрами системы. Проведен аналитический расчет нестабильности уровня ВГ в кабельных сетях 6-10 кВ. Данные полученные путем моделирования и аналитическим способом сверены и удовлетворяют допустимым критериям.

В главе 2.4 проведено моделирование переходных процессов при ОЗ в кабельных сетях 6-10 кВ. В результате моделирования получены осциллограммы переходного тока и напряжения нулевой последовательности и проведен спектральный анализ частотного спектра данных параметров. В результате сформировано первичное требование к релейной защите для обеспечения требуемой чувствительности и селективности.

В главе 2.5 проведена оценка влияния заземления нейтрали на переходные процессы в момент возникновения ОЗ. В результате моделирования установлено что заземление нейтрали не оказывает влияние на переходной процесс при ОЗ, а является фактором, сглаживающим негативные последствия ОЗ.

В главе 2.6 рассмотрена проблема разброса частота при переходных процессах в момент ОЗ с учетом емкостного тока и длины кабельных линий сети. Установлено что необходимо ограничить диапазон частот в пределах 2-3 кГц. Предложено установить ФНЧ. В результате исследования влияния ФНЧ установлено, что данное техническое устройство уменьшает диапазон частот с минимальными потерями энергиями входного сигнала, что ведет к улучшению работы релейной защиты.

В главе 2.7 рассмотрена проблема распознавания вида ОЗ в кабельных сетях 6-10 кВ. В результате проведено исследование на имитационных моделях из главы 2.4. Исследование показало, что прямой способ распознавания является слишком сложным и не может рассматриваться как решение данной проблемы. Однако косвенный способ контроля является допустимым и возможным и не требует внесения дополнительных элементов в систему сети и в систему защиты. Косвенный способ на основе контроля ВГ в токе ОЗ является перспективным и необходимым средством для распознавания вида ОЗ.

Общий вывод, который необходимо сделать что для эффективной защиты потребителя необходимо разработать требования для обеспечения основных требований предъявляемых к релейной защите. Разграничить условия применимости защит с учетом факторов рассмотренных в данной главе.

3 Повышение эффективности релейной защиты кабельных сетей на напряжение 6-10 кВ с учетом технологических особенностей потребителя и эксплуатируемой сети

В кабельных сетях на напряжение 6-10кВ существует множество проблем. Одна из таких проблем однофазные короткие замыкания. Для защиты необходимо использовать многофункциональную защиту. Многофункциональная защита должна включать несколько ступеней защиты и уметь не только отключать поврежденное соединение, но и работать на сигнал.

В некоторых частных ситуациях, допускается не отключать ОЗ, а силами оперативного персонала устранить данное замыкание. Работа в таком аварийном режиме допускается только при соблюдении технологического процесса, допускающем работу с ОЗ.

Исходя из вышесказанного первым критерием которое необходимо включить в комплексную защиту это способность распознавать короткое замыкание, и включить приведенный алгоритм (рисунок 3.1) в первостепенную обработку сигнала.

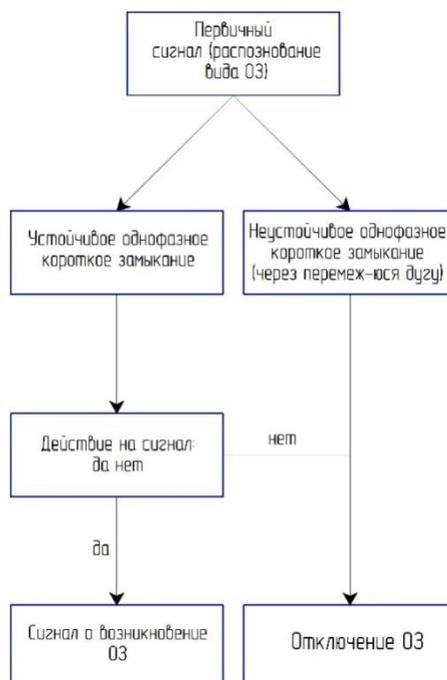


Рисунок 3.1 – Алгоритм первичной обработки сигнала короткого замыкания в момент возникновения ОЗ

В результате исследования проведенного во второй главе (2.7) необходимо использовать косвенный способ распознавания ОЗ. Косвенный способ, который возможно реализовать - это анализ уровня ВГ в переходном токе нулевой последовательности в момент возникновения ОЗ. Данный параметр должен включаться в защиты для кабельных сетей 6-10 кВ с изолированной нейтралью. В компенсированных сетях с заземлением нейтрали через резистор распознавание ОЗ не имеет смысла, поскольку опасные перенапряжения отсутствуют. Однако в компенсированных сетях с заземлением нейтрали через ДГР возможна расстройка компенсации, что приведет к опасным перенапряжениям и многократным пробоям изоляции, поэтому функция распознавания ОЗ необходима. Как было исследовано в главе 2.7 для распознавания вида ОЗ необходимо контролировать содержание ВГ в переходном токе в момент ОЗ поэтому необходимо наличие ТТНП.

После распознавания вида ОЗ необходимо отключить, либо сработать на сигнал. Релейная защита должна быть универсальна и при этом обеспечивать селективность, чувствительность и требования, предписанные ПУЭ и другими нормативными документами. Исходя из вышесказанного необходимо разграничить условия применимости защит и возможные комбинации для повышения эффективности.

Как описано в главе 1 существует множество защит от ОЗ в кабельных сетях 6-10 кВ. Такой фактор как наличие или отсутствие трансформатора напряжения оказывает влияние на отстройку защиты для РП, ТП, ЦП. В некоторых частных случаях при сложной конфигурации сети трансформатор напряжения будет необходим, поскольку это необходимо для обеспечения непрерывного действия релейной защиты.

Самой распространенной защитой является токовая защита нулевой последовательности (ТЗНП). Ограничение по применению защиты рассмотрены в главе 1. Данная защита является необходимой для применения в сетях с изолированной нейтралью где отсутствует трансформатор напряжения. ТЗНП будет первой ступенью которую необходимо реализовать в комплексные

защиты кабельных сетей 6-10 кВ.

Обеспечить требуемую селективность ТЗНП не всегда возможно, поэтому необходимо применение токовой направленной защиты нулевой последовательности (ТНЗНП). Это происходит в результате сложной конфигурации сети, данный фактор был рассмотрен в главе 1. ТНЗНП применяется при устойчивых ОЗ в кабельных сетях 6-10 кВ с изолированной нейтралью и с высокоомным заземлением нейтрали. ТНЗНП является первой ступенью в сетях со сложной конфигурацией, но ограничивается применением на защищаемом объекте трансформатором напряжения. Следует отметить что данная защита не может обеспечивать требуемую чувствительность при ОЗ через перемежающуюся дугу.

Для повышения чувствительности защиты при сложной конфигурации сети необходимо использовать ТНЗНП на основе ВГ, как вторую ступень. Для исключения излишних срабатываний необходимо контролировать общий уровень ВГ в кабельных сетях 6-10 кВ в напряжение нулевой последовательности. Принцип действия данной защиты будет основан на контроле фазных соотношений ВГ тока и напряжения нулевой последовательности в защищаемой кабельной линии. Как было исследовано в поврежденном присоединении гармоники первичного тока и напряжения не совпадают, а в неповрежденном совпадают.

Для повышения чувствительности защит на объектах где не предусмотрена установка трансформаторов напряжения, необходимо включать дополнительно ТЗНП на основе ВГ в токе нулевой последовательности в момент ОЗ. Для уменьшения ложных срабатываний защиты необходимо контролировать общий уровень ВГ в токе нулевой последовательности, а именно необходимо блокировать действие защиты при внешних ОЗ с помощью блока распознавания вида ОЗ. Применимость данной защиты как описано в главе 2 ограничена нестабильным уровнем ВГ на ЦП промышленных предприятий с резким переменным графиком нагрузки и наличием нелинейных приемников электроэнергии.

Для увеличения быстродействия необходимо включать на объектах промышленных предприятий направленную защиту на основе переходных процессов (НЗПП). Принцип действия НЗПП основан на непрерывном контроле фазных соотношений между переходным током и производной напряжения нулевой последовательности. Оптимальным рабочим спектром частот был выбран диапазон 2-3 кГц для минимальных потерь энергии входного сигнала (глава 2.6.2). Данная защита ведет непрерывный контроль на всем интервале времени переходного процесса и может распознавать как внешние, так и внутренние ОЗ. Для защиты от ложных срабатываний в момент коммутационных переключений защищаемой сети необходим алгоритм распознавания возникновения напряжения нулевой последовательности. Данная защита имеет ограничение по применению в результате необходимости использования трансформатора напряжения.

Все защиты, которые описаны выше имеют определённые проблемы и использование одной защиты не представляется целесообразным. Необходимо использовать две и более ступени для обеспечения требуемой чувствительности.

Для крупных производств характерно наличие не только трансформаторов тока на ЦП но и трансформаторов напряжения. Наличие трансформаторов напряжения дает возможность повысить эффективность защиты и ее селективность. Как было описано в главе 1.2.2 на крупных производствах с большим количеством отходящих линий с компенсированной нейтралью ненаправленная защита нулевой последовательности не обеспечивает требуемую чувствительность и селективность. Однако данную защиту можно применять на производствах с изолированной нейтралью в составе комплексной защиты от ОЗ. В промышленных и городских сетях с изолированной нейтралью необходимо применять комплексную защиту с учетом таких факторов: количество присоединений, характер нагрузки, протяженность линий. При большом количестве присоединений необходимо применение направленной защиты токовой нулевой последовательности или

направленной защиты на основе ВГ. Характер нагрузки оказывает влияние на применение защит на основе ВГ, поскольку при высокой нестабильности уровня ВГ технически сложно отстроить защиту и выполнить основные условия, предъявляемые к релейной защите. Применение направленной токовой защиты на основе ВГ так же ограничивает наличие трансформатора напряжения нулевой последовательности ТННП на защищаемом объекте. Различная длина кабельных линий обуславливает необходимость применения низкочастотных фильтров для ограничения верхнего предела разбега высокочастотных колебаний при переходном процессе в момент ОЗ. В результате применения ФНЧ возможно отстроить направленную защиту на основе переходных процессов в момент ОЗ. Защита на основе переходных процессов не обеспечит требуемую чувствительность при малых длинах кабельных линий (глава 2.4.2). Исходя из всего вышесказанного для изолированной нейтрали необходимо иметь функцию распознавания вида ОЗ, при опасном ОЗ необходимо направление сигнала на ненаправленную токовую защиту и дублирующую ненаправленную токовую защиту на основе ВГ (2 ступень), срабатывающую после подачи первичного сигнала на первую ступень в случае ее несрабатывания через интервал времени необходимый для срабатывания первой ступени. Данная конфигурация возможна на РП городского и промышленного типа для защиты каждого присоединения по отдельности, отсутствие большого количества нелинейных электроприемников и ТННП. Структурная схема описанной выше комплексной защиты представлена на рисунке 3.2.

Если РП с изолированной нейтралью имеет большое количество (2 и более) отходящих линий и не имеет ТННП, в этом случае решить вопрос можно путем добавления в схему датчика, фиксирующего наличие повреждения в двух и более линиях тока нулевой последовательности и блокирующего первую ступень обращаясь ко второй ступени (рисунок 3.3).

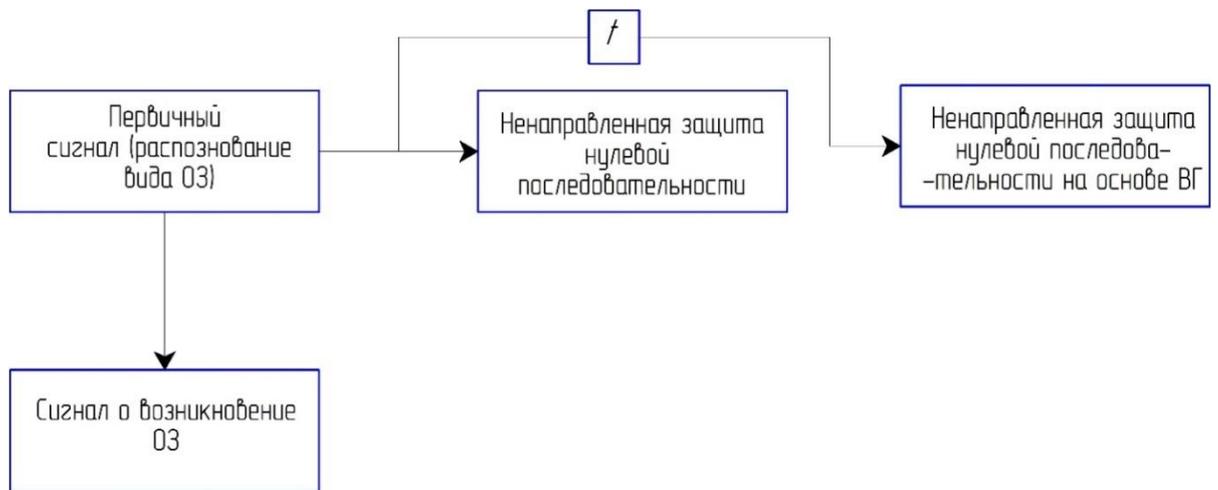


Рисунок 3.2 – Структурная схема РП с изолированной нейтралью без ТННП для защиты единичного отходящего кабеля

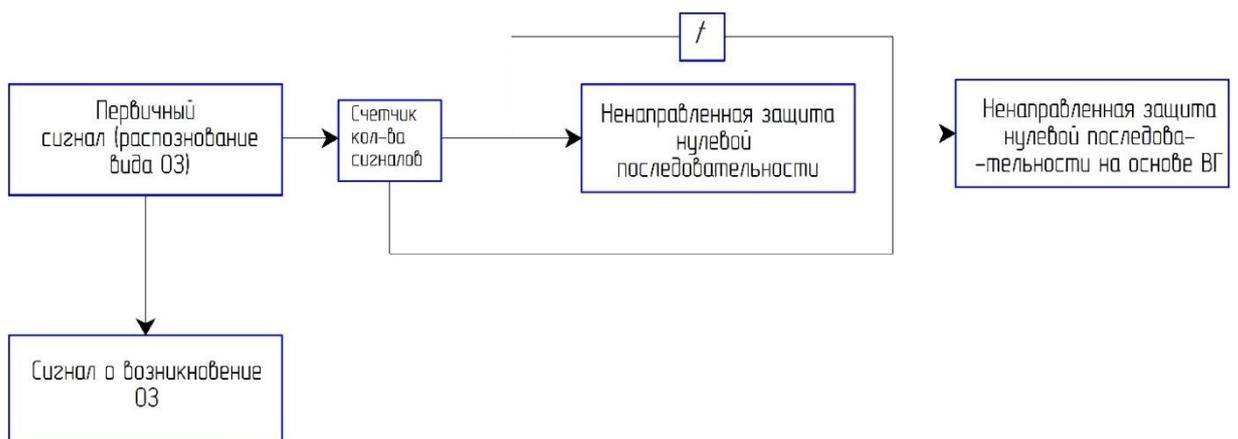


Рисунок 3.3 – Структурная схема РП с изолированной нейтралью без ТННП для защиты 2-х и более отходящих кабелей

На рисунках 3.2,3.3, представлены структурные схемы комплексных защит для РП без ТННП. На РП и ЦП с изолированной нейтралью и наличием ТННП применяются направленные защиты на основе токов нулевой последовательности, на основе ВГ, на основе переходных процессов в момент возникновения ОЗ.

Первой ступенью, как и в сетях без ТННП будет блок распознавания вида ОЗ. После возникновения ОЗ первой ступенью на отключение защиты будет направленная защита на основе токов нулевой последовательности. Защита на основе токов нулевой последовательности не является универсально как было

описано в главе 1.2.2, поэтому необходимо дублирующая защита для соблюдения условий селективности и чувствительности, а также блок фиксирующий направление мощности в момент ОЗ во всех присоединениях. Второй ступенью будет направленная защита на основе ВГ или защита на основе переходных процессов. Стоит отметить что выбор для второй ступени защиты состоит в анализе таких факторов как характер нагрузки и длины защищаемых кабельных линий.

На РП и ЦП питающих производства с резко переменной нагрузкой применение защит на основе ВГ ограничиваются нестабильностью общего уровня ВГ. На таких производствах, описанных в главе 2.3, необходимо применение направленных защит на основе переходных процессов в момент ОЗ. В частных случаях, когда РП и ЦП питают резко переменную нагрузку и имеются защищаемые кабели малой длины для повышения эффективности возможно включение дополнительной ненаправленной защиты нулевой последовательности. Как видно из главы 2.4.3 направленная защита на основе переходных процессов не защищает кабели малой длины. На рисунках 3.3 и 3.4 представлены структурные схемы защит для сетей с изолированной нейтралью и с наличием ТННП на РП и ЦП.

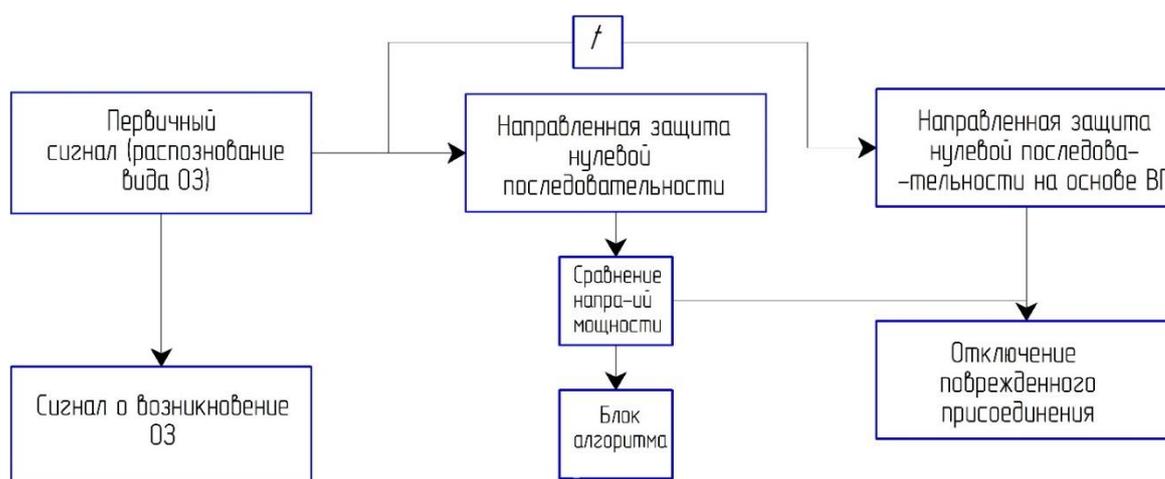


Рисунок 3.4 – Структурная схема комплексной защиты для РП и ЦП с изолированной нейтралью и с отсутствием резко переменной нагрузки

На рисунке 3.4 видно, что необходимо включение в сеть задержки по времени, чтоб дать возможность сработать первой ступени поскольку первая

ступень только в частных случаях не сможет отработать с достаточной селективностью и чувствительностью (глава 1.2.2).

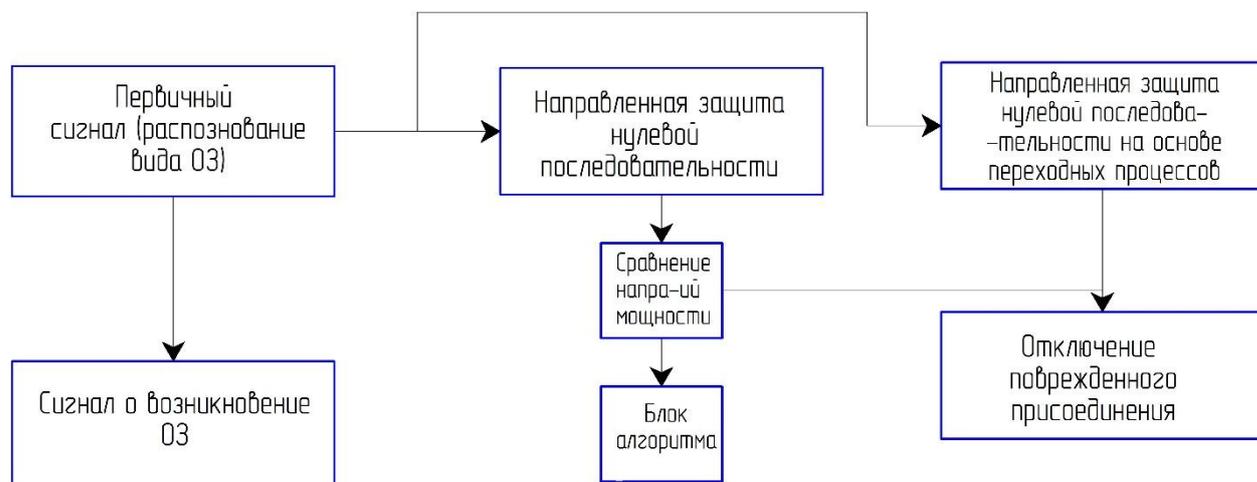


Рисунок 3.5 – Структурная схема комплексной защиты для РП и ЦП с изолированной нейтралью и с наличием резко переменной нагрузки

Следует отметить что на рисунке 3.5, на второй ступени необходим орган фиксирующий сигнал на отключение и срабатывающий с выдержкой времени. Выдержка времени необходима для срабатывания первой ступени защиты.

Замыкания ОЗ через перемежающуюся дугу необходимо разграничить с коммутационными процессами внутри сети для этого и необходим блок распознавания вида ОЗ. Вторая ступень необходима для отключения ОЗ через перемежающуюся дугу поскольку как описано в главе 1.2.2 защиты на основе токов и напряжений нулевой последовательности не обеспечивают требуемой чувствительности и селективности. Для повышения эффективности вводится вторая ступень защиты на основе ВГ и переходных процессов в момент ОЗ.

В компенсированных кабельных сетях 6-10 кВ существует несколько вариантов исполнения нейтрали. При исполнении нейтрали компенсированной кабельной сети через высокоомный резистор или через ДГР с шунтирующим резистором решается проблема опасных перенапряжений поэтому использование блока распознавания ОЗ не является целесообразным (глава 1.2.2,2.5), защита должна распознавать внутренние УОЗ. То есть структурные схемы защиты на рисунках 3.2-3.5 возможны для применения на представленных выше видах заземления нейтрали с учетом исключения блока

распознавания ОЗ. Заземление нейтрали через резистор или ДГР с шунтирующим резистором является частичным решением проблемы перенапряжений в сетях 6-10 кВ и поэтому исследование возникновения ОЗ через перемежающуюся дугу в данной работе не рассматривается.

В сетях с заземлением нейтрали через резистор как видно из главы 2.7 при расстройках компенсации более 15% возникают сильные перенапряжения. Поэтому заземление нейтрали через ДГР без шунтирующего резистора не решает проблему перенапряжений и поэтому в таких сетях необходима защита с блоком распознавания вида ОЗ. В таких сетях необходимо использовать структурные схемы, представленные на рисунке 3.2-3.5 с учетом факторов, описанных для сетей с изолированной нейтралью.

На рисунке 3.5 второй ступенью защиты является защита на основе переходных процессов на основе импульсного органа срабатывания фиксирующим начальные фазные соотношения в поврежденных и неповрежденных присоединениях в момент ОЗ. Единственным недостатком данной защиты является невозможность защитить кабели малой длины в результате технического несовершенства существующих систем.

Как было описано в главе 2.6 разброс в момент возникновения ОЗ может достигать сотен кГц. Для обеспечения требуемой чувствительности и селективности необходимо ограничение верхнего диапазона частот. Особенно необходимо ограничение верхнего диапазона частот для защит на основе переходных процессов, поскольку только тогда возможно отстроить защиту для соблюдения основных требований предъявляемых к релейной защите. В результате исследования в главе 2.6 было доказано что применение фильтров ФНЧ с ограничением верхнего диапазона частот 2-3 кГц, обеспечивает достаточную мощность входного сигнала.

Вывод по главе 3

В главе 3 были проанализированы и предложены варианты повышения эффективности релейной защиты с учетом исследования приведенного в главе

2. Первостепенной задачей является распознавание опасного внутреннего однофазного замыкания через перемежающуюся дугу и его последующее отключение. Для распознавания вида ОЗ и его последующего отключения предложено первым в комплексную защиту включить орган распознавания вида ОЗ. Орган распознавания вида ОЗ нужен на всех видах нейтрали за исключением заземления нейтрали через высокоомный резистор.

После распознавания вида ОЗ в случае внутреннего ОЗ через перемежающуюся дугу идет сигнал на отключение. В случае простой конфигурации сети для РП, ЦП предложено применять ненаправленные защиты, поскольку на мелких объектах распределения не предусмотрено использование трансформаторов напряжения нулевой последовательности.

На крупных ЦП, РП с большим количеством отходящих кабельных линий предложено применять направленные защиты от ОЗ в 2-х ступенчатом варианте. Такое техническое решение опирается на исследование, проведенное в главе 2 и проблемах, описанных в главе 1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе произведено обоснование, исследование и частичное решение проблемы отсутствия разграничения факторов, влияющих на работу релейной защиты при ОЗ.

В первой главе выделены основные проблемы и основные направления в которых необходимо работать чтоб решить проблему неэффективной работы релейной защиты.

Во второй главе проведены исследования факторов, влияющих на характер переходного процесса в момент ОЗ. Как видно из главы 2.2 и 2.3 характер нагрузки и электроприемников оказывает влияние на спектральный анализ форм тока и напряжения, что в свою очередь оказывает на работу релейной защиты. Как видно из главы 2.4 моделирование в программе MATLABSIMULINK показало, что характер разрядных и зарядных составляющих переходного процесса в момент ОЗ зависит от емкостного тока сети и длин кабельных линий. Как видно из главы 2.5 заземление нейтрали на переходной процесс не влияет. Как было исследовано в главе 2.4 частотный пики и частотный спектр не однороден и требуется ограничение частоты с целью повышения чувствительности релейной защиты, поэтому в главе 2.6 проведено исследование влияния фильтрации переходного тока нулевой последовательности на величину полезного сигнала. Как видно из главы 2.6 с уменьшением емкостного тока сети ограничение верхнего диапазона частот становится не целесообразным поскольку идет потеря полезного сигнала на величину более 50 %. Вследствие неоднородности сигнала с учетом емкостного сети была выведено требование о необходимости ограничения верхнего диапазона частот, но только в тех случаях, когда не будет произведена потеря полезного более чем на 50 % с целью уменьшения влияния фильтров низких частот на чувствительность релейной защиты. Как отмечалось в главе 2.2 и 2.3 для корректной работы релейной защиты необходим орган фиксирующий и распознающий вид короткого замыкания. После распознавания вида ОЗ с

учетом рекомендаций и факторов, определяющих селективность и чувствительность, идет направление входного сигнала на определенную ступень защиты. В главе 2.7 исследован косвенный и прямой способ распознавания вида ОЗ. В результате исследования и анализа работ в данной области для фиксирующего органа выбран косвенный метод распознавания ОЗ основанный на контроле ВГ в токе нулевой последовательности. Как видно из главы 2.7 общий уровень в момент возникновения перемежающегося ОЗ превышает предельный уровень и, следовательно, контролируя данный параметр можно распознать вид ОЗ.

В главе 3 разработаны рекомендации и структурные схемы которые с учетом использованного выше исследования должны повысить чувствительность и селективность релейной защиты. Чувствительность повышается за счет добавления второй дублирующей защиты. Добавление второй ступени необходимо для уменьшения факторов в результате которых защит может не сработать, т.е. не почувствовать короткое замыкание. Так же вторая ступень необходима для уменьшения количества ложных срабатываний в виду уменьшения факторов, направленных на ложное срабатывание первой ступени. Все ограничения, представленные в главе 3 и исследования в главе 2 на основе которых были получены рекомендации по использованию защиты можно изменить с учетом конкретного производства или объекта. Все рекомендации являются общими, т.е. возможно дополнение и включение дополнительных ступеней и алгоритмов направленных на повышение основных требований, предъявляемых к релейной защите. В данной работе предложен косвенный способ повышения эффективности релейной защиты путем улучшения чувствительности и селективности, без исследования и разработки нового технического устройства защиты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Seker, S.; Akinci, T.C.; Taskin, S. Spectral and statistical analysis for ferroresonance phenomenon in electric power systems. *Electr. Eng.* 2012, 94, pp. 117–124.
2. Abdallah R. Al-Zyoud, A. Alwadie, A. Elmitwally, Abdallah Basheer. Effect of Neutral Grounding Methods on the Earth Fault Characteristics. *PIERS Proceedings, Prague, Czech Republic, July 6–9, 2015*, pp. 1144-1151.
3. Azari M., Ojaghi M., Mazlumi K., An Enhanced Adaptive Algorithm to Mitigate Mis-coordination Problem of the Third Zone of Distance Relays. *Journal of Applied Research and Technology*, Volume 13, Issue 1, Feb. 2015, pp. 87-96.
4. Ricardo G., Francisco R. B., Emilio R., Carlos A. P. A Novel Ground Fault Non-Directional Selective Protection Method for Ungrounded Distribution Networks, *Energies* 2015, 8, pp. 1291-1316.
5. Henriksen, T. Faulty feeder identification in high impedance grounded network using charge-voltage relationship. *Electr. Power Syst. Res.* 2011, 81, 1832–1839.
6. Wenhong L., Tingqiang G., Xueguang Q. Gonghua W. Ground Fault Line Selection with Improved Residual Flow Incremental Method. *TELKOMNIKA: Indonesian Journal of Electrical Engineering*. 2013, pp. 4683-4690.
7. Ou, T.C. Ground fault current analysis with a direct building algorithm for microgrid distribution. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2013, 53, pp. 867–875.
8. Huang, W.T.; Yao, K.C.; Wu, C.C. Using the direct search method for optimal dispatch of distributed generation in a medium-voltage microgrid. *Energies* 2014, 7, pp.8355–8373.
9. Vernescu V., Goia M.L., Golovanov N. Some Unusual Solutions for European Networks. *Problems of the Regional Energetics*, 2012 pp.19-27.
10. Universidad Politécnica de Madrid. System and method for selective non-directional earth-fault protection in isolated neutral networks. Spanish Patent No. 2374345, 11 February 2013.

11. Ryabtsev V.G, Feklistov A.S., Evseev K.V., «Improved Reliability Memory's Module Structure for Critical Application Systems», Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 6, Issue 1, (Part - 6) January 2016, pp.65-68.
12. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем: учебник для студ. учреждений сред. проф. образования / Э.А. Киреева, С.А. Цырук. — 5-е изд., стер. — М.: Издательский центр «Академия», 2016. — 287 с.
13. Дьяконов, В. П. Simulink. Самоучитель: блочное имитационное моделирование, инструменты и практика моделирования, моделирование в механике, энергетике и радиотехнике / В. П. Дьяконов. - Москва : ДМК Пресс, 2013. - 781 с.
14. Шабад, В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах / В.К. Шабад — М.: Академия, 2013. — 194 с.
15. Долгополов, А.Г. Управляемые шунтирующие реакторы. Релейная защита и автоматика: учебное пособие по курсу "Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем" для студентов, обучающихся по направлению "Электроэнергетика и электротехника" / А. Г. Долгополов; М-во образования и науки Российской Федерации, Нац. исследовательский ун-т "МЭИ". – М.: Изд-во МЭИ, 2013. – 91с.
16. Плащанский, Л. А. Электроснабжение горного производства. Раздел "Релейная защита": учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности "Электрофикация и автоматизация горного производства" / Л. А. Плащанский. - Москва : Горная кн., 2013. – 269 с.
17. Shirkovets, A. Transient Processes at Single Phase-to-Ground Faults in Combined Grounded Networks. «Переходные процессы при однофазных замыканиях на землю в сетях с комбинированным заземлением нейтрали» / A. Shirkovets, A. Vasilyeva, A. Telegin, L. Sarin // Electric Power Quality and Supply Reliability : Proceedings of PQ2012 8th International Conference, Tartu, Estonia, June 11-13, 2012. — Tallinn : Tallinn University of Technology, 2012. - P. 215-221.

18. Вахнина, В.В. Модель дифференциальной токовой защиты силового трансформатора / В.В. Вахнина, Н.А. Черненко // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: сборник трудов IV Международной научно-технической конференции: в 2 ч. - Тольятти: Изд-во ТГУ, 2012. - 4.2. - С. 16-19. 39 25.
19. Вахнина, В.В. Применение ГИС-технологий для моделирования системы электроснабжения города / В.В. Вахнина, В.А. Шаповалов, А.Н. Черненко // Федоровские чтения - 2011; сборник трудов XLI Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием); под общ. ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. - М.: Издательский дом МЭИ, 2011. - С. 121 - 123.
20. Привалов, Е.Е. Диагностика электроэнергетического оборудования. - Москва ; Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 227 с.
21. Жежеленко, И.В. Электромагнитная совместимость в электрических сетях: учебное пособие для студентов и магистрантов учреждений высшего образования по электроэнергетическим специальностям / И. В. Жежеленко, М. А. Короткевич. - Минск : Вышэйшая школа, 2012. - 197 с.
22. Телегин, А. В. Проблематика замыканий на землю и режим заземления нейтрали в сетях среднего напряжения стран Европы и Америки / А. В. Телегин, А. И. Ширковец И Релейная защита и автоматизация. - 2012. - №3. - с.30-39.
23. Вайнштейн, Р.А. Защита от замыканий на землю генераторов и сетей среднего напряжения на основе использования низкочастотных составляющих токов нулевой последовательности: дис. д-ра техн. наук: 05.14.02 / Р.А. Вайнштейн. – Томск, Томский гос. политехн. университет, 2012. – 346 с.
24. Дорохин, Е.Г. Основы эксплуатации релейной защиты и автоматики. Книга 2. Оперативное обслуживание устройств РЗА и вторичных цепей. / Е.Г Дорохин - Краснодар: Советская Кубань, 2012. 432 с.
25. Шуин, В.А. Исследование и разработка защиты от замыканий на

землю в распределительных кабельных сетях 6–10 кВ. Том 5. Разработка технических мер по усовершенствованию алгоритма функционирования защиты абсолютного и относительного замера высших гармонических составляющих при однофазных замыканиях на землю. Отчет по науч. иссл. раб. / В.А. Шуин, Е.С. Шагурина, О.А. Добрягина, Т.Ю. Винокурова. – Иваново, Ивановск. гос. энерг. университет, 2015. – 64 с.

26. Дрозд, В.В. Релейная защита и автоматика в электрических сетях / В.В. Дрозд. - Москва: Альвис, 2012. - 639 с.

27. Правила устройства электроустановок (ПУЭ), 7-е издание, перераб. и доп., с изменениями. М.: Главгосэнергонадзор России, 2017. – 464 с.

28. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Утв. приказом Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. № 229. – М.: ЭНАС, 2016. – 256 с.

29. Сибикин, Ю. Д. Электрические подстанции: учебное пособие / Ю. Д. Сибикин. - Москва : Директ-Медиа, 2014. - 413 с.

30. Михеев, Г.М. Цифровая диагностика высоковольтного электрооборудования / Г. М. Михеев. - Москва : ДМК Пресс, 2015. - 298 с. - Москва : КноРус, 2016. – 487с.

31. ГОСТ 32144-2013 – «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». - Введ. 2014-07-01.— М.: Изд-во Стандартиформ, 2014.— 15 с.