


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)**

Факультет Энергетический  
Кафедра Энергетики  
Направление подготовки 13.04.02 – Электроэнергетика и электротехника  
Направленность (профиль) образовательной программы:  
«Электроэнергетические системы и сети»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

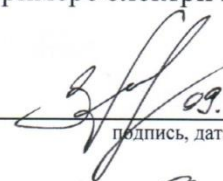
И.о. зав. кафедрой

 Н.В. Савина  
« 12 » 06 2020 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**


на тему: Анализ возможности перевода воздушной линии 110 кВ в  
неполнофазный режим на примере электрической сети Приморского края

Исполнитель  
студент группы 842ом-1

  
подпись, дата


А. Г. Зульфугарова

Руководитель  
канд.техн.наук, доцент

  
подпись, дата

А.Н. Козлов

Руководитель научного  
содержания программы  
магистратуры  
докт. тех наук, профессор

  
подпись, дата


Н.В. Савина

Нормоконтроль  
ст. преподаватель

  
подпись, дата

Н.С. Бодруг

Рецензент

  
подпись, дата

Д.Ю. Журавль


Благовещенск 2020

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
**АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Факультет энергетический  
Кафедра энергетики

УТВЕРЖДАЮ

И.о. зав. кафедрой



Н.В. Савина

2020 г.

**ЗАДАНИЕ**

К выпускной квалификационной работе студента Зульфугаровой  
Александры Геннадьевны

1. Тема выпускной квалификационной работы:

Анализ работоспособности перебора воздушной линии 10кВ маломощной сети на примере энергетической сети Приморского края  
(Учебное задание от 10.06.2020 545-70)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта) 10.06.2020

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: схема энергетической сети Приморского края

4. Содержание выпускной квалификационной работы (перечень подлежащих разработке вопросов):

1. Методические сборы и нормативы, 2. Обзор литературы, 3. Цель работы, 4. Введение, 5. Анализ работы, 6. Настройка нарисованных объектов в программе

5. Перечень материалов приложения (наличие чертежей, таблиц, графиков, схем, программных продуктов, иллюстративного материала и т.п.) Примечание А, Примечание Б, ПВХ Mathcad; графическая часть балансов в ПВХ Vizio; рисунки 6, Таблица 4.

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе (с указанием относящихся к ним разделов)

7. Дата выдачи задания

Руководитель выпускной квалификационной работы: Конов С.Н.

(Фамилия, имя, отчество, должность, ученая степень, учебное звание)

Задание принял к исполнению (дата): 20.06.2020 Зульфугарова А.В.

(Подпись студента)

## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация содержит 89 с., 6 рисунков, 66 формул, 7 таблиц, 2 приложения, 26 источников.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ, ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА, НАПРЯЖЕНИЕ, РЕЖИМ, ВОЗДУШНАЯ ЛИНИЯ, НЕПОЛНОФАЗНЫЙ РЕЖИМ, СЕЧЕНИЕ ПРОВОДА.

В работе исследованы электрические сети Приморского края на возможность перевода воздушных линий 110 кВ в неполнофазный режим работы.

Цель работы – проанализировать способы перевода линий напряжением 110 кВ в неполнофазный режим, когда и для чего осуществляется перевод, проанализировать. А так же рассмотреть порядок действий оперативного персонала при выполнении ремонтных работ на воздушных линиях электропередачи под наведенным напряжением.

## СОДЕРЖАНИЕ

Определения, обозначения, сокращения	5
Введение	6
1 Методологии сбора исходных данных, методов обработки результатов оценки их достоверности и достаточности для магистерской диссертации	8
2 Обзор литературы по теме магистерского исследования и обобщение собранного материала	15
3 Цель перевода воздушной линии в неполнофазный режим	32
3.1 Что такое неполнофазный режим работы линии	32
3.2 Достоинства перевода линий в неполнофазный режим работы	34
3.3 Причина перевода ВЛ в неполнофазный режим работы	36
4 Примеры расчета перевода линии в неполнофазный режим	37
4.1 Подготовка к расчету неполнофазного режима	37
4.2 Расчет неполнофазного режима линии 110 кВ	48
4.3 Анализ неполнофазного режима линий на примере Приморских сетей	55
4.3.1 Расчет неполнофазного режима на линии ПСГлубинная —ПС Восток	55
4.3.2 Расчет неполнофазного режима на линии ПС Тимофеевка —ПС Ольга	57
5 Наведенное напряжение. Вопросы электробезопасности при работе под наведенным напряжением	60
5.1 Причины возникновения наведенного напряжения	60
5.2 Действие персонала при наведенном напряжении	63
5.3 Правила по охране труда при работе под наведенным напряжением	64
Заключение	74
Библиографический список	76
Приложение А - Расчет неполнофазного режима линии Восток-Глубинная	80
Приложение Б- Расчет неполнофазного режима линии ПС Тимофеевка- ПС Ольга	85

## ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ПС – подстанция;

КЗ – короткое замыкание;

ПУЭ – правила устройства электроустановок;

ВЛ – воздушная линия;

ЛЭП – линия электропередачи;

ПВК – программно-вычислительный комплекс.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из видов повреждения в электрических сетях и на электростанциях являются неполнофазные режимы, которые могут сопровождаться коротким замыканием фазы на землю с одной или двух сторон обрыва или без КЗ (обрыв фазного провода без касания земли, недоклучение фаз выключателя или других коммутационных аппаратов). Разрывы фаз, представляющие собой продольную несимметрию, являются источниками напряжений и токов симметричных составляющих, которые оказывают существенное влияние на поведение релейной защиты, вызывая их срабатывание, как например, срабатывание токовых защит нулевой последовательности. Правилами устройства электроустановок такие повреждения, как разрывы фаз на линиях, рассматриваются как ненормальный, но не аварийный режим, и селективная релейная защита для них не предусматривается, что, возможно, вызвано как меньшим термическим воздействием на электроустановки и возможностью их более длительной работы в рассматриваемых режимах, так и дополнительными затратами при оснащении электрических сетей рассматриваемой защитой

Ознакомившись с основной тематикой исследовательских работ, в качестве исследуемого направления была выбрана тема: «Анализ возможности перевода воздушных линий 110кВ в неполнофазный режим».

Объектом научного исследования будут приняты непосредственно воздушные линии 110 кВ.

Предметом исследования будет неполнофазный режим работы ВЛ 110 кВ.

Цель работы – проанализировать способы перевода линий напряжением 110 кВ в неполнофазный режим, когда и для чего осуществляется перевод, рассмотреть расчет и сделать оценку наведённого напряжения на фазе, выведенной в ремонт. А так же рассмотреть ход

действий оперативного персонала при выполнении ремонтных работ на воздушных линиях электропередачи высокого напряжения.

В результате выполнения поставленной задачи рассмотреть следующее:

1. Плюсы и минусы перевода линий в неполнофазный режим. Также рассмотреть другие перспективы ремонта ВЛ.
2. Показать пример расчета перевода линии в неполнофазный режим на примере существующей воздушной линии.
3. Рассмотреть вопросы электробезопасности при работе ремонтных бригад на ВЛ высокого класса напряжения.

За объект исследования примем существующие ВЛ, относящиеся к электроэнергетической системе Приморского края.

В ходе работы были использованы следующие программные продукты: MSVisio, Mathcad, MSWord.

# 1 МЕТОДОЛОГИИ СБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ, МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОЦЕНКИ ИХ ДОСТОВЕРНОСТИ И ДОСТАТОЧНОСТИ ДЛЯ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Успешное проведение любых научных исследований в значительной степени зависит от своевременного обеспечения оперативной и полной информацией о достижениях науки и техники, эффективного использования её в научно-исследовательских, проектно-конструкторских и производственных предприятиях. Получение информации об объекте исследования является одной из основных составляющих статистического исследования. При статистическом исследовании следует руководствоваться целями и требованиями к результатам. Они определяют методы статистического анализа, исходя из которых организуется сбор исходных данных. В процессе статистического исследования следует опасаться следующих ошибок: нечетко сформулированных целей, некорректно примененных методов и ошибок при получении исходных данных.

Получение исходных данных для статистического исследования может осуществляться двумя способами:

- 1) активный эксперимент, специально организованный для определения статистических зависимостей;
- 2) статистическое наблюдение.

Данные должны отвечать двум требованиям:

- 1) достоверность;
- 2) сопоставимость.

Достоверность - это соответствие данных тому, что есть на самом деле.

Вся методика, организация и техника проведения статистического наблюдения должны быть нацелены на обеспечение достоверных данных. Общими условиями обеспечения достоверности являются полнота охвата наблюдаемого объекта, полнота и точность регистрации данных по каждой единице наблюдения. Сравнимость данных разных наблюдений выполняется,



если использовались одно и то же определение единицы наблюдения, одна и та же методика регистрации первичных признаков и методика расчета вторичных признаков (таких, как себестоимость, производительность труда, рентабельность, ликвидность и т.д.). Важным условием сравнимости является сохранение времени проведения наблюдения и периода или момента, к которому относятся регистрируемые данные.

Результаты любого эксперимента фиксируются в той или иной форме, затем их используют с целью обработки. Операции сбора и обработки в одних случаях могут быть совмещены во времени, в других случаях обработка экспериментальных данных является самостоятельным этапом.

Методы обработки экспериментальной информации зависят от того, какова модель, для уточнения которой проводится эксперимент. Фактически обработка экспериментальных данных – это преобразование информации к виду, удобному для использования, перевод результатов наблюдения с языка измерений на язык уточняемой модели. Модель может принадлежать к одному из двух типов: классифицированным или числовым моделям. Тип моделей зависит от знаний об объекте, для которого строится модель. Знания могут быть как первоначальными, приближенными, так и достаточно полными, хорошо структурированными, хотя и требующими уточнения. Классификационная модель носит качественный характер, хотя в ней могут участвовать и количественные переменные.

Для проведения эксперимента любого типа необходимо:

- сформулировать гипотезу, подлежащую проверке;
- создать программы экспериментальных работ;
- определить способы и приемы вмешательства в объект исследования;
- обеспечить условия для осуществления процедуры экспериментальных работ;
- разработать пути и приемы фиксирования хода и результатов эксперимента;
- подготовить средства эксперимента (модели, установки, приборы и т.п.);

– обеспечить эксперимент необходимым обслуживающим персоналом.

При измерении любой физической величины ее значение всегда получается с ошибкой.

Погрешности измерений могут возникнуть вследствие недостаточно тщательного проведения опыта, несовершенства методов и средств измерений, влияния различных неучтенных факторов в процессе опыта и субъективных особенностей самого исследования.

Ошибки (погрешности) классифицируются на грубые, систематические и случайные.

#### 1. Систематические погрешности.

К систематическим погрешностям относят погрешности, которые при повторных измерениях остаются постоянными или изменяются по какому-либо закону. Систематические погрешности при измерении одним и тем же методом и одними и теми же измерительными средствами всегда имеют постоянные значения. К причинам, вызывающим их появление, относят:

- погрешности метода или теоретические погрешности;
- инструментальные погрешности;
- погрешности, вызванные воздействием окружающей среды и условий измерения.

Погрешности метода происходят вследствие ошибок или недостаточной разработанности метода измерений. Сюда же можно отнести непропорциональную экстраполяцию свойства, полученного в результате единичного измерения, на весь измеряемый объект.

К погрешностям метода относят также влияние инструмента на свойства объекта (например, значительное измерительное усилие, изменяющее форму тонкостенной детали) или погрешности, связанные с чрезмерно грубым округлением результата измерения.

Инструментальные погрешности связаны с погрешностями средств измерения, вызванными погрешностями изготовления или износом составных частей измерительного средства.

Одним из методов обнаружения систематической погрешности может быть замена средства измерений на аналогичное в случае, если оно предположительно является источником систематической погрешности. Подобным образом можно обнаружить систематическую погрешность, вызванную внешними условиями: например, замена поверхности, на которую установлено измерительное средство, на более жесткую.

Появление систематической погрешности можно обнаружить статистически, нанося с заданной периодичностью результаты измерений на бумагу с заданными границами (например, предельными размерами). Устойчивое движение результата измерений в сторону одной из границ будет означать появление систематической погрешности и необходимости вмешательства в технологический процесс. Для исключения систематической погрешности в производственных условиях проводят поверку средств измерений, устраняют те причины, которые вызваны воздействиями окружающей среды, сами измерения проводят в строгом соответствии с рекомендуемой методикой, принимая в необходимых случаях меры по ее совершенствованию.

Постоянные систематические погрешности не влияют на значения случайных отклонений измерений от средних арифметических, поэтому их сложно обнаружить статистическими методами. Анализ таких погрешностей возможен только на основании априорных знаний о погрешностях, получаемых, в частности, при поверке средств измерений. Например, при поверке средств измерений линейных величин измеряемая величина обычно воспроизводится образцовой мерой (концевой мерой длины), действительное значение которой известно. Систематические погрешности приводят к искажению результатов измерений и потому должны выявляться и учитываться при оценке результатов измерений. Полностью систематическую погрешность исключить практически невозможно; всегда в процессе измерения остается некая малая величина, называемая

неисключенной систематической погрешностью. Эта величина учитывается путем внесения поправок.

## 2. Случайные погрешности.

Случайные погрешности – это погрешности, принимающие при повторных измерениях различные, независимые по знаку и величине значения, не подчиняющиеся какой-либо закономерности. Причин, вызывающих случайные погрешности, может быть много; например колебание припуска на обработку, механические свойства материалов, посторонние включения, точность установки деталей на станок, точность средства измерения в заготовке, изменение измерительного усилия крепления детали на станке, силы резания и др.

Как правило, индивидуальное влияние каждой из этих причин на результаты измерения невелико и не поддается оценке, тем более что, как всякое случайное событие, оно в каждом конкретном случае может произойти или нет.

Для случайных погрешностей характерен ряд условий:

- малые по величине случайные погрешности встречаются чаще, чем большие;

- отрицательные и положительные относительно средней величины измерений, равные по величине погрешности, встречаются одинаково часто;

для каждого метода измерений есть свой предел, за которым погрешности практически не встречаются (в противном случае эта, погрешность будет грубым промахом).

Выявление случайных погрешностей особенно необходимо при точных, например, лабораторных измерениях. Для этого используют многократные измерения одной и той же величины, а их результаты обрабатываются методами теории вероятностей и математической статистики. Это позволяет уточнить результаты выполненных измерений.

Влияние случайных погрешностей выражается в разбросе полученных результатов относительно математического ожидания, поэтому

количественно наличие случайных погрешностей хорошо оценивается среднеквадратическим отклонением (СКО).

Случайные погрешности измерения, не изменяя точности результата измерений, тем не менее, оказывают влияние на его достоверность. При этом дисперсия среднего арифметического ряда измерений всегда имеет меньшую погрешность, чем погрешность каждого определенного измерения.

### 3. Грубые погрешности (промахи).

Грубые погрешности – это погрешности, не характерные для технологического процесса или результата, приводящие к явным искажениям результатов измерения. Наиболее часто они допускаются неквалифицированным персоналом при неправильном обращении со средством измерения неверным отсчетом показаний, ошибками при записи или вследствие внезапно возникшей посторонней причины при реализации технологических процессов обработки деталей. Они сразу видны среди полученных результатов, так как полученные значения отличаются от остальных значений совокупности измерений.

Если в процессе измерений удастся найти причины, вызывающие существенные отличия, и после устранения этих причин повторные измерения не подтверждают подобных отличий, то такие измерения могут быть исключены из рассмотрения. Но необдуманное отбрасывание резко отличающихся от других результатов измерений может привести к существенному искажению характеристик измерений. Иногда при обработке результатов измерений учет всех обстоятельств, при которых они были получены, не представляется возможным. В таком случае при оценке грубых промахов приходится прибегать к обычным методам проверки статистических гипотез.

Для разработки данной по теме магистерской диссертации необходимо уточнить расчетные данные, экспериментальная проверка работы ВЛ, оборудования подстанций, электростанций и потребителя в НФНР, определить величину помех на линии связи, попадающие в зону влияния

несимметрично работающей ВЛ, а также подготовка оперативно-диспетчерского и эксплуатационного персонала к быстрому переводу ее в режим работы двумя фазами.

Для этого предусматривается:

1. Проведение измерений отклонения напряжения на шинах подстанций, присоединенных к данной линии, и, если это возможно, у ответственных потребителей.

2. Проведение измерений токов прямой и обратной последовательностей на генераторах ближайших электростанций;

3. Проведение измерений уровней опасных и мешающих влияний на близлежащих линиях;

4. Проверка правильности отстройки релейной защиты от токов неполнофазного режима;

5. Наблюдение за работой оборудования при работе линии в НФНР и контроль за величиной тока в нейтральных трансформаторов;

Так же для выполнения работы необходимо собрать следующие данные:

- фазировка рассматриваемой линии;

- определить места разрыва фазы конкретно для каждой подстанции (фаза линии, имеющая пофазное управление, отключается выключателями, линейными разъединителями или отделителями, при отсутствии пофазного управления разрыв может быть осуществлен, в зависимости от местных условий, путем демонтажа любого из спусков соответствующей фазы к разъединителю, демонтажа участка шин соответствующей фазы между линейным разъединителем и выключателем и т.д.).

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМЕ МАГИСТЕРСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОБЩЕНИЕ СОБРАННОГО МАТЕРИАЛА

1. Экспериментальная проверка и перевод ВЛ 110 и 220 кВ с односторонним питанием в неполнофазный нагрузочный режим [5,6].

Анализ повреждений на линиях электропередачи (ВЛ) 110, 220 кВ показывает, что более 60% устойчивых аварийных отключений приходится на однофазные замыкания и обрывы одной фазы ВЛ. На линиях с односторонним питанием эти аварии сопровождаются длительным обесточением потребителей и большим аварийным недоотпуском электроэнергии. Как правило, при авариях остаются отключенными все фазы линии в течение всего времени поиска места повреждения и ремонта. Между тем, переход на работу ВЛ двумя фазами по заранее составленной инструкции позволяет, в большинстве случаев, значительно сократить длительность перерыва энергоснабжения и аварийный недоотпуск электроэнергии потребителям. Кроме аварийных переходов на работу ВЛ двумя фазами, неполнофазный нагрузочный режим может быть предусмотрен как мероприятие, значительно повышающее надежность работы электрической системы, например, при проведении пофазного ремонта линий электропередачи, пофазной плавки гололеда.

В [5] рассматривается Пофазное управление линиями электропередачи. Пофазное управление линиями электропередачи в существующих системах получило широкое распространение, так как это мероприятие в значительной степени увеличивает надежность электроснабжения потребителей без существенных дополнительных капитальных затрат.

Применение пофазного АПВ, вместо трехфазного, позволяет увеличить при замыканиях на землю время отключенного состояния фаз линии без нарушения ее устойчивости при передаче мощности нормального режима. Предельное значение времени работы при отключенном состоянии

поврежденных фаз в процессе АОПВ не должно, как известно, превышать время деионизации воздушного промежутка по месту замыкания.

Экспериментальная проверка, проведенная в последнее время, еще раз подтвердила возможность применения ОАПВ на линиях напряжением до 220 кВ и длиной до 500 км, на которых происходит погасание дуги не более чем через 250 мксек после отключения поврежденной фазы. Как правило, для линий 220 кВ предельное по условиям динамической устойчивости время отключенного состояния оказывается значительно больше. На линиях 400 кВ длиной свыше 250 км совсем не происходит погасание дуги в месте замыкания на землю даже после отключения поврежденной фазы, вследствие чего успешное автоматическое повторное включение оказывается невозможным. Поддержание тока в дуге осуществляется при этом индуктированным напряжением от здоровых фаз.

Для линий на напряжение 400 кВ длина участка в 250 км является предельной, при которой произойдет погасание дуги по месту повреждения и окажется возможным осуществить пофазное управление линий.

В [6]. Установки продольной компенсации являются неотъемлемым элементом сверхдальних передач переменного тока. Одним из способов достижения цели продольной компенсации — уменьшения продольной индуктивности воздушной линии (ВЛ) — является настройка линии на резонанс напряжений или резонанс токов. Эта идея была предложена в работах И. И. Соловьёва и А. А. Вульфа в первой половине XX века. Позднее, профессором Н. Ф. Ракушевым в работе был предложен способ реализации данной идеи — разомкнутая линия электропередачи, каждая фаза которой состоит из двух изолированных друг от друга проводников, один из которых (прямая составляющая) подключен к шинам передающей подстанции, а второй (встречная составляющая) — к шинам приёмной. При достаточной длине линии взаимная емкостная проводимость, созданная между прямой и обратной составляющей, могла бы полностью скомпенсировать собственную индуктивность линии.



2. Способ перевода в неполнофазный режим двухцепной комбинированной линии электропередачи[1-4].

Способ перевода в неполнофазный режим двухцепной комбинированной линий электропередачи, содержащей трехфазную цепь высшего напряжения и расположенную под ней трехфазную цепь низшего напряжения, каждая из которых подключена к линии, заключающийся в отключении поврежденной фазы цепи высшего напряжения, отличающийся тем, что, с целью повышения пропускной способности в неполнофазном режиме, осуществления экологической защиты под линией, влияния неполнофазного режима на линии связи, отключают две фазы цепи низшего напряжения, разноименные с поврежденной фазой, отсоединяют их от одноименных фаз цепи высшего напряжения и включают параллельно третьей фазе цепи низшего напряжения, а также повышают напряжение цепи низшего напряжения и понижают напряжение цепи высшего напряжения за счет изменения коэффициента трансформации трансформаторов на максимально допустимую величину.

В [1]. Вопросы использования неполнофазных режимов ЭЭС связаны с проведением обстоятельных расчетов, что требует разработки специальных методов, алгоритмов и проблемно-ориентированного программного обеспечения. Известны два подхода к решению указанных задач, - с помощью фазных координат и метода симметричных составляющих. Метод фазных координат обладает возможностью простого моделирования пофазного различия параметров оборудования, в первую очередь нетранспонированных линий электропередачи, что позволяет решать ряд специфических задач электроэнергетики. Недостатком его является потребность примерно в шесть раз большего объема оперативной памяти по сравнению с симметричными составляющими, значительный объем информации, требующийся для формирования схем замещения, и необходимость работать с несимметричной матрицей узловых параметров. Одновременно с этим использование симметричных составляющих

открывает лучшую возможность совместимости с существующими схемами последовательностей энергосистем, которые по числу узлов приближаются к нескольким тысячам. С этих позиций более предпочтительным является метод симметричных составляющих, не смотря на определенные трудности в формировании моделей элементов ЭЭС с учетом пофазной несимметрии. Для больших ЭЭС в ряде случаев может оказаться целесообразным совместное использование двух подходов при разработке соответствующего математического и программного обеспечения.

В [2]. Важное место среди мероприятий, способствующих уменьшению влияния аварий на электрические системы, занимают осуществление ликвидаций неустойчивых повреждений на них в цикле однофазного автоматического повторного включения (ОАПВ). Использование неполнофазных режимов линий целесообразно еще и потому, что большинство аварий на них - это однофазные короткие замыкания (КЗ). В последнее время ведутся работы по совершенствованию характеристик ОАПВ для одноцепных линий 500 кВ и выше:

- осуществление контроля исчезновения замыкания на поврежденной фазе и блокирование включений в случаях, когда замыкание не устранилось ;
- для повышения уровня устойчивости и снижения объема управляющих воздействий противоаварийной автоматики предлагается вводить задержку на отключение неповрежденных фаз линии при неуспешных ОАПВ. Следующим шагом этого направления могло бы быть исследование широкого круга вопросов перехода в отдельных случаях после неуспешного ОАПВ сразу на длительный неполнофазный режим. Однако такая задача может быть решена в дальнейшем. В данной работе рассматриваются только длительные неполнофазные режимы, организованные после трехфазного отключения поврежденного оборудования. Такой режим может быть необходим как для осуществления пофазного ремонта, так и другой подготовительной работы, например, перевозки фазы трансформатора и др.

В [3]. Применение длительных НПФР может потребовать меньших затрат, чем другие способы резервирования. В связи с этим использование НПФР целесообразно учитывать при проектировании энергетических систем.

Если к трехпроводной (одноцепной) электропередаче добавить еще один провод, который в трехфазном эксплуатационном режиме находится в отключенном состоянии, то при устойчивых однофазных КЗ необходимо отключать только поврежденный провод, а вместо него включать резервный, и тогда линия будет продолжать работать как трехпроводная. Кроме того, резервный провод может также включаться вместо любого рабочего провода в режиме пофазного ремонта или пофазной плавки гололеда. Таким образом, одноцепная электропередача с резервным проводом при устойчивых однофазных повреждениях также надежна, как двухцепная, но капитальные затраты на ее сооружение значительно меньше.

В [4]. При использовании метода симметричных составляющих предлагаются, два основных подхода к расчету: применение комплексных схем замещения и расчетных выражений. В первом случае исходная схема сети преобразуется к более сложной, содержащей подсистемы прямой, обратной и нулевой последовательностей. В зависимости от вида несимметрии, например, обрыв одной либо двух фаз, указанные подсистемы объединяются параллельно или последовательно через специальные многополюсники связи в местах возникновения источников несимметрии. Причем в зависимости от особой фазы эти многополюсники могут не обладать взаимностью. Поэтому такой подход приводит к необходимости оперировать несимметричной матрицей узловых коэффициентов.

### 3. Перенапряжения при неполнофазных режимах [7,11].

Перенапряжения при неполнофазных режимах в электрических системах возникают при обрыве провода линии, который обычно сопровождается падением на землю (заземлением) одного из концов провода, при отказе одной фазы выключателя во время включения или отключения линии, при перегорании плавких вставок в одной или двух фазах.

В [7]. Методика анализа несинусоидальных режимов электрических систем базируется на методе симметричных составляющих. Данный метод используется для линейных систем. Метод симметричных составляющих представляется в виде трех однолинейных схем замещения.

Наиболее просто метод симметричных составляющих выполняется для симметричных систем при несимметричных возмущениях. В данной ситуации матрица сопротивлений в симметричных координатах оказывается диагональной, и любое из уравнений становится независимым от других, точнее сказать расчеты режимов прямой, обратной, нулевой последовательностей можно проводить обособлено. Симметричные составляющие ограниченно используются для расчета несимметричных систем. Увеличение количества несимметрий в электрической системе приводит к сдерживанию применению симметричных составляющих. Из-за этого применение метода симметричных составляющих затруднено.

Особенно продуктивно задачу расчета сложно-несимметричных режимов можно решить на основе применения метода фазных координат. При его применении электрическую систему можно описывать трехлинейной схемой. Данная методика может рассматривать различные типы трехфазных линий (короткие замыкания, разрывы проводов), присутствие расщепленных линейных проводов и грозозащитных тросов.

Решающим достоинством метода фазных координат является получение точных моделей элементов электроэнергетических систем таких, как кабельные и воздушные линии, однофазные и трехфазные трансформаторы различных модификаций, синхронные и асинхронные машины. Все же два условия препятствуют применению симметричных составляющих наравне с фазными координатами. Первое - формулировка матрицы сопротивлений берет свое начало в фазных координатах, где необходима точная исходная модель. Второе - соединение схем замещения различных последовательностей сравнительно сложны.

В [11]. Качество напряжения в электроэнергетической системе зависит от многих противоречивых обстоятельств. Потребление мощности непостоянно, но имеет ярко выраженные максимумы и минимумы, как в годовом, так и в суточном диапазонах времени. В соответствии с этим изменяется режим генерации мощности и передачи ее по линиям. Линии электропередачи являются сложными электромагнитными системами, которые не только передают активную мощность, но и сами генерируют или потребляют реактивную мощность в зависимости от режима передачи. При передаче натуральной мощности по линии ее электромагнитное поле полностью скомпенсировано: линия не генерирует и не потребляет реактивную мощность. При передаче мощности меньше натуральной линия генерирует избыточную реактивную мощность. Максимальная генерация реактивной мощности соответствует режиму холостого хода линии, когда ее электрическое поле не скомпенсировано магнитным полем. По мере роста нагрузки (передаваемой по линии мощности) ток в линии увеличивается и соответственно увеличивается мощность магнитного поля, компенсирующего часть электрического поля линии. При передаче натуральной мощности по линии мощность ее электрического и магнитного полей одинакова, что обеспечивает взаимную их компенсацию.

#### 4. Расчет наведенных напряжений на воздушных ЛЭП [9,10].

Известно, что на проводах и тросах воздушных линий электропередачи (ЛЭП), выведенных в ремонт и находящихся вблизи действующих воздушных ЛЭП, наводится напряжение относительно земли, значение которого может быть опасным для работающего на воздушной линии персонала. Значение наведенного напряжения, главным образом, зависит от тока во влияющей воздушной ЛЭП, длины участка сближения и расстояния между фазами рабочей и выведенной в ремонт воздушной ЛЭП. Поэтому особый интерес представляют двухцепные воздушные линии электропередачи, когда цепи находятся на одной опоре и расстояния между ними определяется длиной траверс опоры. Цель— исследование уровней

наведенных напряжений на выведенных в ремонт двухцепных воздушных линиях электропередачи при установке переносного заземления на рабочем месте. Актуальность этого вопроса обоснована тем, что установка или снятие переносного заземления (проводимое пофазно) осуществляется по отдельному наряду. Следовательно, установку или снятие переносного заземления необходимо рассматривать как вид работ под наведенным напряжением.

В [9]. В методических указаниях МУ определены точки на отключенной ВЛ, где имеют место наибольшие значения наведенных напряжений, приводится содержание программы проведения измерений, требования к составу персонала, проводящего измерения, меры обеспечения безопасности, технологическая последовательность проведения измерений. Предложена расчетная модель для предварительной оценки величин наведенного, напряжения на отключаемой ВЛ, приведен перечень необходимых исходных данных для расчетов. Настоящие МУ разработаны взамен Методических указаний по измерению наведенных напряжений на отключенных ВЛ, проходящих вблизи действующих ВЛ напряжением 35 кВ и выше и контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока (М. СПО ОРГРЭС, 1993 г.), с учетом результатов измерений величин наведенных напряжений на ВЛ в ряде энергосистем РФ (Свердловэнерго, Челябинэнерго, Ленэнерго, Архэнерго, Пермьэнерго, Псковэнерго, Костромаэнерго, Саратовэнерго, Смоленскэнерго, Нижновэнерго, МЭС Урала, МЭС Центра, МЭС СевероЗапада и др.), Украины, Белоруссии и Казахстана, теоретических и экспериментальных исследований, расчетов по специально разработанным программам.

5. Расчет наведенного напряжения на отключенных линиях электропередачи 110 кВ [14,17].

На практике измерения наведенных напряжений реально осуществимы лишь в ограниченном количестве точек по длине исследуемых отключенных линий при нагрузках во влияющей сети, заданных действующим режимом

работы энергосистемы. Однако эти нагрузки во время измерений могут значительно отличаться от тех значений, которые будут существовать во время ремонта. Проведение измерений, особенно в зимний период, трудноосуществимо. Таким образом, точность измерений наведенных напряжений непосредственно перед ремонтом по методике, рекомендуемой нормативными документами, низка. Поэтому корректно сравнивать с измерениями можно только расчеты, выполненные с абсолютно одинаковыми исходными данными.

В [10]. Разработана математическая модель воздушной линии электропередачи, находящейся под наведенным напряжением. Наведенное напряжение обусловлено электромагнитным полем близко расположенной линии электропередачи, находящейся в работе. Математическая модель позволяет определять значения наведенного напряжения на отключенных проводах воздушных линий электропередачи и значения ожидаемого напряжения прикосновения к опорам, на которые выполнено заземление отключенных проводов и грозозащитных тросов. Провода и грозозащитные тросы отключенной линии представлены звеньевой схемой замещения с сосредоточенными параметрами. Влияние электрического и магнитного полей моделируется включением в схему эквивалентных поперечных и продольных ЭДС. Продольные ЭДС, обусловленные влиянием переменного магнитного поля, определяются через взаимную индуктивность проводов. Предложен алгоритм, позволяющий с помощью численного интегрирования определить взаимную индуктивность между парой проводов, расположенных над неоднородной землей, приведенной к горизонтально-слоистой структуре. Математическая модель учитывает наличие транспозиции проводов, влияющей и подверженной влиянию воздушных линий, режим заземления грозозащитных тросов, несимметрию и несинусоидальность влияющих токов и напряжений, изменение геометрии расположения проводов по длине воздушных линий, различные значения сопротивлений заземляющих устройств опор. В разработанной модели воздушную линию можно

моделировать отдельными пролетами или укрупненными блоками, например, анкерными участками. Также возможно смоделировать любую схему заземления отключенных проводов и грозозащитных тросов в любых точках рассматриваемой воздушной линии электропередачи.

Выполнение электромонтажных работ на проводах отключенной цепи двухцепных и многоцепных линий электропередачи сопряжено с опасностью для здоровья и жизни обслуживающего персонала из-за угрозы поражения наведенным электрическим током. Определение наведенных токов и напряжений на проводах воздушных линий электропередачи (ВЛ) возможно двумя способами – практическим и расчетным. В данной статье остановимся только на расчетных методах определения наведенного напряжения. Федеральной сетевой компанией утверждены методические указания (МУ) по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ [1]. Данные МУ применимы только к одноцепным ВЛ и позволяют определить ожидаемое напряжение прикосновения в местах заземления проводов отключенной ВЛ без учета транспозиций, режима заземления грозозащитного троса и других факторов, существенных для значений наведенных напряжений и токов.

6. Способы снижения уровня наведенного напряжения на ремонтируемой двухцепной линии электропередачи [21-24].

Проблема наведённых напряжений и обеспечения безопасности работы ремонтного персонала на отключённых ВЛ обсуждается долгое время, и всё же остаётся актуальной. Трудность решения этой проблемы, оценки опасности или безопасности работ на конкретной линии заключается в том, что как расчётные, так и измеренные значения наведённых напряжений не являются однозначными, поскольку зависят от многих параметров (количества влияющих линий и схем их сближения с ремонтируемой линией, геометрии, нагрузок и режимов работы влияющих ВЛ, удельного сопротивления грунта по трассе линий, которое само зависит от сезона и погодных условий). В связи с этим, большое значение для обеспечения



безопасной работы ремонтного персонала на отключённых линиях электропередачи приобретает расчётная оценка возможных величин наведённых напряжений.

В [23]. В условиях труднодоступной местности и значительной протяженности линий 10 кВ успешное ОМП позволяет значительно сократить перерыв в электроснабжении потребителей. Применяющиеся на данный момент средства РЗиА не позволяют своевременно выявить повреждения и селективно определить место 033 в сетях с изолированной или компенсированной нейтралью. При 033 фидер 10 кВ может долго находиться в работе, так как система линейных напряжений не изменяется и потребитель не отключается. Необходимо иметь средства сигнализации (регистрации) 033 с последующим его устранением, так как часто 033 переходят в ДЗЗ из-за повышения напряжений на неаварийных фазах. В свою очередь ДЗЗ сопровождаются большими токами замыкания, сравнимыми с токами при двухфазных коротких замыканиях. При этом, средства РЗиА не всегда реагируют на ДЗЗ при их возникновении в конце фидеров 6-10-35 кВ. Таким образом, АР с замыканиями на землю требуют дальнейшего исследования.

7. Определение наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ [12,14].

Основные положения по проведению измерений наведенных напряжений на отключаемых ВЛ, находящихся в зоне влияния других ВЛ электрической сети. Изложены условия возникновения наведенных напряжений, приводится характеристика схем заземления отключаемых ВЛ и измерений наведенных напряжений. В МУ определены точки на отключенной ВЛ, где имеют место наибольшие значения наведенных напряжений, приводится содержание программы проведения измерений, требования к составу персонала, проводящего измерения, меры обеспечения безопасности, технологическая последовательность проведения измерений. Предложена расчетная модель для предварительной оценки величин

наведенного, напряжения на отключаемой ВЛ, приведен перечень необходимых исходных данных для расчетов.

В [12]. Согласно ПОТ воздушные линии под наведенным напряжением - это линии, которые проходят по всей длине или на отдельных участках вблизи действующих воздушных линий или вблизи контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока и на отключенных проводах которых при различных схемах их заземления и при наибольшем рабочем токе влияющих воздушных линий наводится напряжение более 25 В. При параллельном расположении линий, сооруженных на двухцепных (многоцепных) опорах, наводится наибольшее по сравнению с другими расположениями линий наведенное напряжение в отключенной линии. Это также отражено в Правилах Устройства Электроустановок п. 1.7.53 [Правила устройства электроустановок (ПУЭ), Утверждено Министерством энергетики РФ, приказ от 8 июля 2002 г. №204, Введено с 01.01.2003. Далее в тексте - просто ПУЭ].

В [14]. Неполнофазные режимы в электрических системах возникают при обрыве провода линии, который обычно сопровождается падением на землю (заземлением) одного из концов провода, при отказе одной фазы выключателя во время включения или отключения линии, при перегорании плавких вставок в одной или двух фазах.

#### 8. Расчет неполнофазного режима на воздушных линиях 110 кВ [8].

Неполнофазный режим работы трехфазной линии может возникнуть по разным причинам. На ЛЭП СВН – из- за действия ТЗНП при однофазных коротких замыканиях. Этот режим не является длительным, т.к. на таких линиях устанавливаются устройства ОАПВ.

На тупиковых линиях 110-220 кВ к работе на двух фазах прибегают при необходимости выполнения ремонтов, если согласно расчетам такой режим допустим.

9. Нормативные основы безопасности работ под наведённым напряжением [13,15,18-20,25-27].

Согласно ПОТ воздушные линии под наведенным напряжением - это линии, которые проходят по всей длине или на отдельных участках вблизи действующих воздушных линий или вблизи контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока и на отключенных проводах которых при различных схемах их заземления и при наибольшем рабочем токе влияющих воздушных линий наводится напряжение более 25 В. При параллельном расположении линий, сооруженных надвухцепных (многоцепных) опорах, наводится наибольшее по сравнению с другими расположениями линий наведенное напряжение в отключенной линии. Это также отражено в Правилах Устройства Электроустановок п. 1.7.53 [Правила устройства электроустановок (ПУЭ), Утверждено Министерством энергетики РФ, приказ от 8 июля 2002 г. №204, Введено с 01.01.2003. Далее в тексте - просто ПУЭ].

Отдельно в ПОТ выделены меры безопасности при работах на таких линиях, когда заземление их в соответствии с общими требованиями правил не позволяет в месте производства работ снизить уровень наводящегося на отключенных проводах потенциала ниже 25 В. Пункт 4.15.53 ПОТ гласит: «Если на отключенной воздушной линии (цепи), находящейся под наведенным напряжением, не удастся снизить это напряжение до 25 В, необходимо работать с заземлением проводов только на одной опоре или на двух смежных. При этом заземлять воздушную линию (цепь) в распределительном устройстве не допускается. Допускается работа бригады только с опор, на которых установлены заземления, или на проводе в пролете между ними».

В [13, 15]. Требования правил по охране труда при эксплуатации электроустановок распространяются на работодателей — юридических и физических лиц независимо от их организационно-правовых форм и работников из числа электротехнического, электротехнологического и неэлектротехнического персонала организаций, занятых техническим обслуживанием электроустановок, проводящих в них оперативные

переключения, организующих и выполняющих строительные, монтажные, наладочные, ремонтные работы, испытания и измерения, а также осуществляющих управление технологическими режимами работы объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей. Требования безопасности при эксплуатации специализированных электроустановок, в том числе контактной сети электрифицированных железных дорог, городского электротранспорта должны соответствовать правилам по охране труда при эксплуатации электроустановок с учётом особенностей эксплуатации, обусловленных конструкцией данных электроустановок.

В [25] Промышленные инфраструктуры, в том числе и объекты электроэнергетики, оказывают значительное влияние на окружающую среду. Так, существование большого числа различных энергообъектов, являющихся источниками электромагнитных излучений, приводит к тому, что в настоящее время интенсивность электромагнитных полей многократно превосходит уровень естественного магнитного поля Земли. Прежде всего, это оказывает негативное влияние на здоровье людей, а также обостряет проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) технических структур в энергетике, что в свою очередь затрагивает надёжность функционирования ЭЭС в связи с постоянным внедрением современных микропроцессорных средств управления этими системами, и, кроме того, во многом предопределяет качество радиовещательных, телевизионных и других видов связи.

В [26]. С позиций электробезопасности особенностью электроустановок электроэнергетических систем являются не только высокие номинальные напряжения электрооборудования, но и сильные электрические и магнитные поля, создаваемые этим оборудованием. Это порождает, по крайней мере, три проблемы, решаемые в настоящее время:

– воздействие электрического и магнитного полей на организм человека;

- электромагнитная совместимость оборудования;
- наведенные напряжения на отключенных частях электроустановки или на сторонних электропроводящих частях и коммуникациях.

Наведенные напряжения являются одной из причин электротравматизма, доля смертельных случаев при котором наиболее высока. Это может быть обусловлено, по крайней мере, тремя взаимосвязанными причинами:

- неполнотой и недостатками действующих Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок, которые не содержат специального раздела «Организация работ на оборудовании, находящемся под наведенным напряжением»;

- отсутствием практики измерений наведенного напряжения перед началом работ;

- игнорированием (недооценкой) экономических потерь энергопредприятий от электротравматизма и из-за нерациональной организации работ.

Наведенное напряжение может появиться как на отключенных токоведущих частях электроустановки, на которых предполагается производств работ, так и на открытых проводящих частях самой электроустановки, а так же на объектах, расположенных вблизи нее (например, воздушные линии связи, трубопроводы и т. д.). Безопасность работ на сторонних объектах – это предмет отдельного исследования. При работах в самой электроустановке наведенное напряжение может появиться на заземленных частях оборудования, на раскатываемых проводах и кабелях (в том числе при измерении заземляющего устройства), на устройствах, связанных с отключенной ВЛ (линейные разъединители, аппаратура ВЧ-связи и т. п.).

Принципиальным вопросом электробезопасности является также согласование нормативов на безопасное значение напряжения. Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) [9] введен термин: «1.7.43. Сверхнизкое

(малое) напряжение (СНН) – напряжение, не превышающее 50 В переменного и 120 В постоянного тока». В нормальном режиме электроустановки СНН является мерой защиты от прямого прикосновения (1.7.50 ПУЭ). В Правилах по охране труда [5] фигурирует значение 25 В, ниже которого напряжения являются безопасными (это предполагается), и ВЛ не считается линией, находящейся под наведенным напряжением.

В [27] 1.1.1. Правила имеют целью обеспечить надежную, безопасную и рациональную эксплуатацию электроустановок и содержание их в исправном состоянии.

1.1.2. Правила распространяются на организации, независимо от форм собственности и организационно-правовых форм, индивидуальных предпринимателей и граждан - владельцев электроустановок напряжением выше 1000 В (далее - Потребители). Они включают в себя требования к Потребителям, эксплуатирующим действующие электроустановки напряжением до 220 кВ включительно. Правила не распространяются на электроустановки электрических станций, блок-станций, предприятий электрических и тепловых сетей, эксплуатируемых в соответствии с правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей.

1.1.3. Расследование и учет нарушений в работе электроустановок Потребителей производятся в соответствии с установленными требованиями.

1.1.4. Расследование несчастных случаев, связанных с эксплуатацией электроустановок и происшедших на объектах, подконтрольных госэнергонадзору, проводится в соответствии с действующим законодательством.

1.1.5. Эксплуатация электрооборудования, в том числе бытовых электроприборов, подлежащих обязательной сертификации, допускается только при наличии сертификата соответствия на это электрооборудование и бытовые электроприборы.

В соответствии с Законом о техническом регулировании [10] в части нормирования безопасности определяющим документом является ГОСТ

«Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов». Этот документ регламентирует норму напряжения прикосновения в нормальных режимах работы электроустановки 2 В (предел ощущения), а при возможности длительного воздействия – 20 В (предел судорог и болевого воздействия). Последняя цифра относится к случаю длительного замыкания на землю в электроустановке, что аналогично длительному протеканию наведенного тока. По-видимому, в указанном диапазоне (от 2 до 20 В) и должно лежать значение, определяющее опасное наведенное напряжение.

## 3 ЦЕЛЬ ПЕРЕВОДА ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ В НЕПОЛНОФАЗНЫЙ РЕЖИМ ПРИ РЕМОНТНЫХ РАБОТАХ

### 3.1 Что такое неполнофазный режим работы линии

Неполнофазный режим - это несимметричный режим, являющийся источником напряжения и тока обратной последовательности. По уставке мощности обратной последовательности происходит пуск защиты. Если по направлению повреждение определено в защищаемой линии происходит останов блокирующего приемо-передатчика. Второй полукомплект защиты на другом конце работает аналогично. Если какой-то полукомплект установил, что повреждение вне защищаемой зоны (за спиной) то включается приемо-передатчик, который блокирует отключение обоих полукомплектов. Частота ВЧ обмена около 15 кГц. Для промышленной частоты 50 Гц (колебание 0,02 с) скорость обмена 15 кГц это целая жизнь. В электросети ничего не успеет произойти и её быстро автоматически проанализируют и отключат.

Неполнофазные режимы работы в сетях с глухозаземленными нейтралью характеризуются появлением в напряжениях и токах слагающих обратной и нулевой последовательностей, определяемых током нагрузки предшествующего режима. Эти слагающие могут неблагоприятно влиять на поведение релейной защиты, которая в большинстве случаев должна отключать защищаемый элемент только при внутреннем КЗ. Неполнофазный режим работы может применяться в аварийных условиях, а также при проведении ремонтных работ на линиях электропередач.

Неполнофазные режимы работы ВЛ, а иногда и трансформаторов практически используются в послеаварийных режимах на период ремонта поврежденного элемента. Например, известно, что наибольшее количество устойчивых повреждений ВЛ являются однофазными. Поэтому в случае питания потребителей одиночной линией напряжением 110 - 220 кВ,



работающей с заземленной нейтралью, целесообразно оборудовать ее пофазным управлением. При повреждении одного фазного провода он отключится, а потребитель будет получать питание по двум другим фазам. Это существенно повышает надежность электроснабжения потребителей и не требует сооружения дорогой резервной линии. То же относится и к группам из однофазных трансформаторов. Ток в заземлителе получается наибольшим в неполнофазном режиме работы линии. При одновременном включении фаз выключателя кратковременно возникает неполнофазный режим работы линии, характеризуемый разрывом на контактах выключателя одной или двух фаз. В связи с этим в линии кратковременно появляется ток нулевой последовательности. Длительность прохождения тока нулевой последовательности при включении выключателя с трехфазным приводом такова, что от него представляется возможным отстроиться по времени без введения выдержки времени. При этом необходимая отстройка обеспечивается выходным промежуточным реле со временем срабатывания 70 - 100 мсек. При использовании выключателей с пофазным приводом замедление на срабатывание, которое имеет выходное промежуточное реле, уже недостаточно для отстройки от неполнофазного режима. Отстройка от указанного режима должна производиться или по току или по времени. В последнем случае дополнительная выдержка времени для первой ступени защиты, а также ступени, ускоряемой при АПВ, должна быть порядка 0.2 - 0.3 сек. Расчеты показывают, что на длине одного шага транспозиции линии 400 кВ ток, стекающий с троса в неполнофазном режиме работы линии, может достигать 12 А, что при сопротивлении растеканию заземлителя опоры 10 Ом приводит к появлению на опоре напряжения около 120 В и, следовательно, является недопустимым по условиям безопасности. Ток, стекающий с троса на длине одного анкерного пролета, оказывается меньше 15 А. При этом напряжение на опоре не превосходит допустимых значений даже при отсутствии связи ее через другой трос с соседними опорами. Схемы защит радиальных линий с односторонним питанием, согласно последним

решениям, предусматривают двукратное АПВ с возможным переводом линий на неполнофазный режим работы. При переводе линии на длительную работу двумя фазами следует при необходимости принимать меры к уменьшению помех в работе линий связи из-за неполнофазного режима работы линии. Явления перегрузки возникают при неправильном расчете допустимого сечения токоведущих жил проводов или из-за дополнительного подключения непредусмотренных проектом потребителей, механических перегрузок на валу, неполнофазных режимов работы двигателей и понижений напряжения сети.

### **3.2 Достоинства перевода линий в неполнофазный режим работы**

Достоинства:

Анализ повреждений на линиях электропередачи (ВЛ) 110, 220 кВ показывает, что более 60% устойчивых аварийных отключений приходится на однофазные замыкания и обрывы одной фазы ВЛ. На линиях с односторонним питанием эти аварии сопровождаются длительным обесточением потребителей и большим аварийным недоотпуском электроэнергии. Как правило, при авариях остаются отключенными все фазы линии в течение всего времени поиска места повреждения и ремонта. Между тем, переход на работу ВЛ двумя фазами по заранее составленной инструкции позволяет, в большинстве случаев, значительно сократить длительность перерыва энергоснабжения и аварийный недоотпуск электроэнергии потребителям. Кроме аварийных переходов на работу ВЛ двумя фазами, неполнофазный нагрузочный режим может быть предусмотрен как мероприятие, значительно повышающее надежность работы электрической системы, например, при проведении пофазного ремонта линий электропередачи, пофазной плавки гололеда.

Неполнофазный режим работы может применяться в аварийных условиях, а также при проведении ремонтных работ на линиях электропередач.

По степени требований к надежности электроснабжения потребители, о которых идет речь, относятся в основном к 2-й и 3-й категориям, однако имеется некоторое количество потребителей 1-й категории. Как было показано, что с увеличением длины линий централизованного электроснабжения способ резервирования питания путем сооружения второй линии становится более затратным по сравнению с вариантом одноцепной ВЛ и резервированием от ДЭС.

При использовании ДЭС лишь как аварийного источника потребность в дизельном топливе многократно снижается, а срок службы ДЭС соответственно возрастает. При этом мощность ДЭС не обязательно должна покрывать всю нагрузку. Однако такое решение возможно при достаточной надежности питания по одноцепной ВЛ 110кВ. Поэтому задача заключается в том, чтобы повысить ее надежность без существенного увеличения капитальных затрат.

Недостатки:

– В условиях работы линии электропередачи в НФНР нарушается симметрия сети и появляются токи нулевой последовательности, проходящие в земле. При этом происходит возрастание электромагнитного и электростатического влияния ВЛ на линии связи и железнодорожную сигнализацию;

– Работа ВЛ с заземленной нейтралью в НФНР разрешается в течение двух часов без уведомления организаций, эксплуатирующих линии связи и железнодорожную сигнализацию. В случае, когда линия работает в НФНР более двух часов, организация, эксплуатирующая ВЛ, обязана сообщить об этом персоналу, эксплуатирующему линии связи и железнодорожную сигнализацию, в установленном порядке, для принятия соответствующих мер;

– Для ВЛ, ширина сближения которых не превышает 300 м, необходим предварительный анализ величин влияний несимметрично работающей ВЛ на линии связи и железнодорожную сигнализацию. ВЛ,

работающая в несимметричном режиме, оказывает на цепи линии связи и сигнализацию опасные и мешающие влияния;

– Перевод линии в неполнофазный режим затратно. В зависимости от потребителя можно было бы построить еще одну линию при условии, если у потребителя есть перспектива.

### **3.3 Причина перевода ВЛ в неполнофазный режим работы**

Основной целью применения неполнофазных режимов работы в электрических сетях является сохранение в эксплуатации на достаточном уровне надежности электроснабжения потребителей при выводе в ремонт как плановый, так и послеаварийный отдельных фаз линии. Так же перевод ВЛ в неполнофазный режим осуществляется в том случае, когда полное отключение потребителя невозможно.

## 4 ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА ПЕРЕВОДА ЛИНИИ В НЕПОЛНОФАЗНЫЙ РЕЖИМ

### 4.1 Подготовка к расчету неполнофазного режима

Неполнофазный режим работы трехфазной линии может возникнуть по разным причинам. На ЛЭП СВН – из-за действия ТЗНП при однофазных коротких замыканиях. Этот режим не является длительным, т.к. на таких линиях устанавливаются устройства ОАПВ. На тупиковых линиях 110-220 кВ к работе на двух фазах прибегают при необходимости выполнения ремонтов, если согласно расчетам такой режим допустим.

Цель данной главы – показать методику расчета неполнофазного режима и уяснить критерии допустимости этого режима.

Неполнофазный режим может быть использован в электрических сетях во время ремонта поврежденной ВЛ, что существенно повышает надежность электроснабжения. Допустимость такого режима должна оцениваться с учетом: – соблюдения требований ГОСТ 13109-67 в части отклонений и несимметрии напряжения основной частоты у потребителей; – неперевышения нормированных предельных нагревов силового трансформатора; – неперевышения предельных токовых нагрузок оборудования, установленного в цепи заземленных нейтралей и самих заземляющих устройств; – сохранения необходимой селективности настройки устройств релейной защиты; – неперевышения предельно допустимых по ПТЭ величин неравенства токов в фазах генераторов и синхронных компенсаторов; – неперевышения предельно допустимых уровней помех на линиях связи и железнодорожной сигнализации, находящихся в зоне влияния данной несимметрично работающей ВЛ. При решении этой задачи проверку заданного несимметричного режима можно ограничить проверкой соблюдения требований ГОСТ 13109- 67 и загрузки трансформатора.

Расчет проводится с использованием метода симметричных составляющих. Накладываются (совмещаются) два режима: полнофазный нагрузочный (существовавший до возникновения обрыва провода на ВЛ) и дополнительный с разрывом одной фазы. Для упрощения расчета учитываются только продольные индуктивные сопротивления элементов сети, а полные сопротивления нагрузки (для прямой и обратной последовательностей  $1_n z$  и  $2_n z$ ) вводятся в расчетные схемы как сопротивления индуктивные:

$$\begin{aligned} z_{1n} &= j \times x_{1n} = j \times 1,2 \times x_n, \\ z_{2n} &= j \times x_{2n} = j \times 0,35 \times x_n \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_n$  – сопротивление нагрузки.

Параметры расчетной схемы целесообразно определить в единицах, приведенных к базисному напряжению, в качестве которого принимается напряжение на стороне НН трансформатора, коэффициент трансформации которого равен:

$$K = \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} \quad (2)$$

где  $ВН U$  – заданное номинальное напряжение ВЛ.

В этом случае приведенное сопротивление прямой и обратной последовательности ВЛ равно:

$$x_{n1} = x_{n2} = x \cdot L \cdot \frac{1}{K^2}, \quad (3)$$

А сопротивление нулевой последовательности ВЛ, учитывая наличие грозозащитного троса, равно:

$$x_{\lambda 0} = 3 \cdot x_{\lambda 1} \quad (4)$$

Для трансформатора со схемой соединения обмоток «звезда с нулем/треугольник» значения сопротивлений всех трех последовательностей могут быть приняты равными:

$$x_{T1} = x_{T2} = x_{T0} = \frac{U_x}{100} = \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_T} \quad (5)$$

Приведенное сопротивление нагрузки равно

$$x_H = \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_H} \quad (6)$$

Сопротивления расчетных схем (определенных для сети в целом) для прямой и обратной последовательностей представляют собой цепочку из последовательно включенных сопротивлений линии, трансформатора и нагрузки и определяются по следующим формулам:

– для прямой последовательности:

$$x_{1S} = x_{\lambda 1} + x_{T1} + x_{H1} \quad (7)$$

– для обратной последовательности:

$$x_{2S} = x_{\lambda 2} + x_{T2} + x_{H2} \quad (8)$$

В полном сопротивлении нулевой последовательности, в соответствии с условиями задачи, только два последовательно включенных элемента – сопротивление линии и трансформатора (так как на стороне ВН трансформатора нейтраль обмотки заземлена наглухо, а линия питается от системы бесконечной мощности):

$$x_{0\Sigma} = x_{l0} + x_{T0} \quad (9)$$

Комплексная схема замещения для дополнительного режима представляет собой параллельное соединение сопротивлений  $x_1$ ,  $x_2$  и  $x_0$

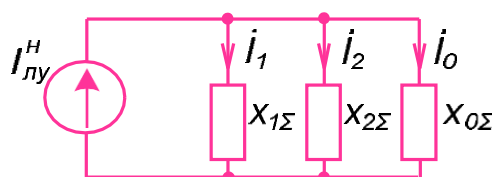


Рисунок 1 – Комплексная схема замещения

Эта комплексная схема включена параллельно месту разрыва ВЛ на ток нагрузки предшествующего полнофазного режима, который определяется по формуле:

$$I^H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}} \quad (10)$$

В соответствии со сформулированным выше принципом наложения действительный ток прямой последовательности  $I_1$ , определяется сложением тока прямой последовательности дополнительного режима  $d.p. I_1$  с током предшествующего полнофазного режима  $I_n$ :



$$I_1 = I_1^{\text{д.р.}} + I_H \quad (11)$$

Из схемы на рисунке 1 находим токи отдельных последовательностей путем распределения тока  $I_H$  пропорционально суммарным проводимостям схем отдельных последовательностей:

$$I_1^{\text{д.р.}} = \frac{1/x_{1\Sigma}}{1/x_{1\Sigma} + 1/x_{2\Sigma} + 1/x_{0\Sigma}} \cdot I_H = \frac{x_{\Delta}}{x_{1\Sigma}} \cdot I_H \quad (12)$$

$$I_2^{\text{д.р.}} = \frac{1/x_{2\Sigma}}{1/x_{1\Sigma} + 1/x_{2\Sigma} + 1/x_{0\Sigma}} \cdot I_H = \frac{x_{\Delta}}{x_{2\Sigma}} \cdot I_H \quad (13)$$

$$I_0^{\text{д.р.}} = \frac{1/x_{0\Sigma}}{1/x_{1\Sigma} + 1/x_{2\Sigma} + 1/x_{0\Sigma}} \cdot I_H = \frac{x_{\Delta}}{x_{0\Sigma}} \cdot I_H \quad (14)$$

$$\text{где } x_{\Delta} = \frac{1}{1/x_{1\Sigma} + 1/x_{2\Sigma} + 1/x_{0\Sigma}} \quad (15)$$

Необходимо обратить внимание на то, что токи обратной и нулевой последовательностей являются реальными (действительными) токами в исходной схеме сети, в связи с чем индексы "д.р." при токах  $I_2$  и  $I_0$  в (13) и (14) отсутствуют. Что касается реального тока прямой последовательности в месте разрыва, то в соответствии с (11) и (12) он определяется по формуле:

$$I_2^{\text{д.р.}} = I_1^{\text{д.р.}} + I_H = I_H \cdot \left( 1 - \frac{x_{\Delta}}{x_{2\Sigma}} \right) \quad (16)$$

В соответствии с основными положениями метода симметричных составляющих значения токов в фазах ВЛ и обмотках ВН трансформатора равны:

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_1 + I_2 + I_0 \\
 I_B &= I_1 \cdot a^2 + I_2 \cdot a + I_0 \\
 I_C &= I_1 \cdot a + I_2 \cdot a^2 + I_0
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

где  $a$  и  $a^2$  – операторы фазы

$$\begin{aligned}
 a &= -0,5 + j \cdot 0,866 \\
 a^2 &= -0,5 + j \cdot 0,866
 \end{aligned}
 \tag{18}$$

Для коэффициента обратной последовательности токов вводится обозначение  $\alpha_{2i}$ , он рассчитывается по формуле:

$$\alpha_{2i} = -\frac{I_2}{I_1}
 \tag{19}$$

Знак " минус " в выражении (12.19) введен в связи с тем, что в начальной фазе  $A$  векторы прямой и обратной последовательностей сдвинуты друг относительно друга на угол, близкий к  $180^\circ$ .

На рисунке 2 выполнено графическое построение векторов  $3\bar{I}_{A1}$  и  $3\bar{I}_{A2}$  по заданной системе линейных  $\bar{I}_{AB}$ ,  $\bar{I}_{BC}$ ,  $\bar{I}_{AC}$  и фазных  $\bar{I}_A$ ,  $\bar{I}_B$ ,  $\bar{I}_C$  векторов.

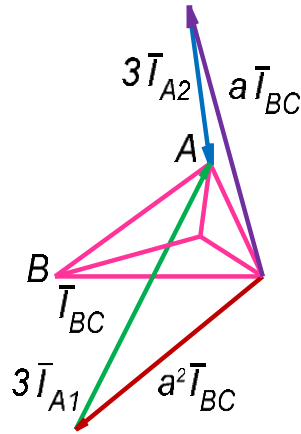


Рисунок 2—Графическое построение векторов

При построении используются известные соотношения:

$$3I_{A1} = I_A \cdot a \cdot I_B + I_C \cdot a^2 \cdot I_C = I_B - I_{AB} \cdot a \cdot I_B + a^2 \cdot (I_B + a^2 \cdot I_{BC}) = a^2 \cdot I_{BC} - I_{AB} \quad (20)$$

$$3I_{A2} = I_B - I_{AB} + a^2 \cdot I_B + a^2 \cdot (I_B + a^2 \cdot I_{BC}) = a^2 \cdot I_{BC} - I_{AB}$$

По условиям задачи  $I_0 = -(I_1 + I_2)$ , поэтому, используя формулу, получим:

$$I_0 = -(I_1 + I_2) \quad (21)$$

Подставляя в (17) соотношение (19) и (21), получаем:

$$I_B = I_1 \cdot [a^2 - 1 - a_{2i} \cdot (a^2 - 1)] \quad (22)$$

$$I_C = I_1 \cdot [a - 1 - a_{2i} \cdot (a^2 - 1)]$$

Для расчета модулей фазных токов подставляем значения  $a$  и  $a^2$  из(16) в (22):

$$\left| \frac{I_B}{I_1} \right| = \left| \frac{I_C}{I_1} \right| = \sqrt{3} \cdot \sqrt{a_{2i}^2 - a_{2i} + 1} \quad (23)$$

Допустимая нагрузка трансформатора определяется из условия, что ток в обмотке не превышает номинальную величину, т.е.:

$$I_B = I_H \quad (24)$$

Таким образом, предельно допустимая величина тока прямой последовательности рассчитывается по формуле:

$$I_{доп} = \frac{I_H}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{a_{2i}^2 - a_{2i} + 1}} \quad (25)$$

Диапазон изменения  $\alpha_{2i}$  от 0 до 1,0 предполагает изменение величины  $I_{доп}$  и  $I_B$  в пределах от 0,58 до 0,67 (максимальное значение достигается при  $(\alpha_{2i} = 0,5)$ ).

В соответствии с требованиями ГОСТ 13109-67 к качеству напряжения необходимо в несимметричном режиме определить следующие коэффициенты: обратной последовательности напряжений  $\varepsilon_2$  и нулевой последовательности напряжений  $\varepsilon_0$ :

$$\begin{aligned} \varepsilon_2 &= \frac{U_{a2}^2}{S_{ан}} \cdot 100, \% \\ \varepsilon_0 &= \frac{U_{a0}^2}{S_{ан}} \cdot 100, \% \end{aligned} \quad (26)$$

где  $U_{ан}$ - номинальная величина;  $U_{a2}$ и  $U_{a0}$ - соответственно составляющие обратной и нулевой последовательностей напряжения на стороне НН.

ГОСТ 13109-67 нормирует только величину  $\varepsilon_2$ : на зажимах любого трехфазного симметричного приемника длительно допустимо:

$$\varepsilon_{2доп}=2\% \quad (27)$$

Ограничение не распространяется на электросети, присоединенные к шинам тяговых подстанций железных дорог, электрифицированных на переменном токе. Величина  $\varepsilon_0$  может иметь такие значения, при которых отклонение напряжения не выходит за пределы допустимых по ГОСТ 13109-67 в послеаварийных режимах (с учетом влияния и таких факторов, как отклонение напряжений прямой и обратной последовательностей). Величина допустимого снижения напряжения при неполнофазном режиме лежит в пределах от 7,5 до 10 % от номинального.

Для определения качества напряжения на шинах НН необходимо от токов в обмотке ВН трансформатора перейти к токам в обмотке НН, соединенной в треугольник. Эти токи, приведенные к одному напряжению, определяются по системе уравнений:

$$I_{a1} = I_1 \cdot a^{j30^0} = (0,866 + j \cdot 0,5) \cdot I_1 \quad (28)$$

$$I_{a2} = I_2 \cdot a^{j30^0} = (0,866 + j \cdot 0,5) \cdot I_2$$

Вводя коэффициент обратной последовательности тока  $\alpha_2$  и принимая во внимание указанные в (1) значения сопротивления нагрузки, определяем симметричные составляющие напряжения на шинах НН:

$$U_{a1} = j \cdot 1,2 \cdot x_n \cdot I_{a1} = I_1 \cdot x_n \cdot (j \cdot 1,04 - 0,6) \quad (29)$$

$$U_{a2} = j \cdot 0,5 \cdot x_n \cdot I_{a2} = I_1 \cdot x_n \cdot a_2 \cdot (-j \cdot 0,303 - 0,175)$$

Фазные напряжения на стороне НН определяются как:

$$\begin{aligned} U_a &= U_{a1} + U_{a2} = I_1 \cdot x_n \cdot [j \cdot (1,04 - 0,303 \cdot a_2) - 0,6 - 0,175 \cdot a_2] \\ U_b &= a^2 \cdot U_{a1} + U_{a2} = I_1 \cdot x_n \cdot [j \cdot (1,2 + 0,35 \cdot a_2)] \\ U_c &= a \cdot U_{a1} + a^2 \cdot U_{a2} = I_1 \cdot x_n \cdot [-j \cdot (1,04 - 0,303 \cdot a_2) - 0,6 - 0,175 \cdot a_2] \end{aligned} \quad (30)$$

Линейные напряжения:

$$\begin{aligned} U_{ab} &= U_a - U_b = I_1 \cdot x_n \cdot [-j \cdot (1,04 - 0,303 \cdot a_2) - 1,8 - 0,525 \cdot a_2] \\ U_{bc} &= U_b - U_c = I_1 \cdot x_n \cdot [-j \cdot (1,04 - 0,303 \cdot a_2) - 1,8 + 0,525 \cdot a_2] \\ U_{ca} &= U_c - U_a = I_1 \cdot x_n \cdot j \cdot (1,606 \cdot a_2 - 2,08) \end{aligned} \quad (31)$$

модули линейных напряжений на стороне НН:

$$\begin{aligned} |U_{ab}| &= |U_{bc}| = I_1 \cdot x_n \cdot \sqrt{4,32 + 1,25 \cdot a_2 + 0,366 \cdot a_2^2} \\ |U_{ca}| &= |I_1 \cdot x_n \cdot (0,606 \cdot a_2 - 2,08)| \end{aligned} \quad (32)$$

Коэффициент обратной последовательности напряжения можно получить, подставляя в (26) модуль напряжения обратной последовательности, определенный по(29):

$$\varepsilon_2 = \frac{|U_{a2}|}{U_{нн}} = \frac{0,35 \cdot I_2 \cdot x_n}{U_{нн}} \cdot 100 \quad (33)$$

В случае, если показатели качества напряжения в несимметричном режиме неудовлетворительны, следует прибегнуть к искусственному выравниванию несимметрии, например, путем установки батареи статических конденсаторов.

При обрыве фазы А на стороне ВН компенсирующие емкости следует включить на линейные напряжения  $U$  все  $U$  авна стороне НН. Емкость батареи можно определить следующим образом. Вначале находится допустимое значение составляющей обратной последовательности напряжения на стороне НН (здесь и далее указаны модули соответствующих величин):

$$U_{2доп} = \varepsilon_{2доп} \cdot U_n = 0,02 \cdot U_n \quad (34)$$

где  $U_n$ - номинальное напряжение на шинах НН.

Соответствующая допустимая величина тока обратной последовательности:

$$I_{доп} = \frac{U_{2доп}}{x_{2н}} = \frac{U_{2доп}}{0,35 \cdot x_n} \cdot 0,058 \cdot \frac{U_n}{x_n} \quad (35)$$

и потребный ток компенсации:

$$I_k = I_2 - I_{доп} = I_2 - 0,058 \cdot \frac{U_n}{x_n} \quad (36)$$

Емкость батареи равна:

$$C_3 = \frac{I_k}{U_n \cdot \omega} = \frac{I_k}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_n} \quad (37)$$

С учетом частичной компенсации тока обратной последовательности значение коэффициента обратной последовательности тока определяется как:

$$a'_2 = \frac{I_{2\partial on}}{I_1} = 0,058 \cdot \frac{U_n}{x_n \cdot I_1} \quad (38)$$

Подставляя полученное значение  $a'_2$  в выражения (32), можно определить величину напряжения на шинах НН с учетом компенсирующей установки.

#### 4.2 Расчет неполнофазного режима линии 110 кВ

Длина ВЛ  $L=150$  км, мощность трансформатора  $S_T=80$  МВ·А, нагрузка трансформатора на стороне 10,5 кВ  $S_H=30$  МВ·А. Трансформатор имеет схему соединения «звезда с нулем/треугольник», нейтраль на стороне ВН заземлена. Напряжение КЗ трансформатора  $U_k=10,5\%$ . ВЛ на одноцепных опорах, защищена грозозащитным тросом, удельное индуктивное сопротивление ВЛ  $x = 0,4$  Ом/км – рис. 3.

**Необходимо определить:** показатели несимметричного режима, оценить качество напряжения и загрузку трансформатора, уточнить необходимость в специальной установке компенсации на шинах НН трансформатора и определить мощность этой установки.

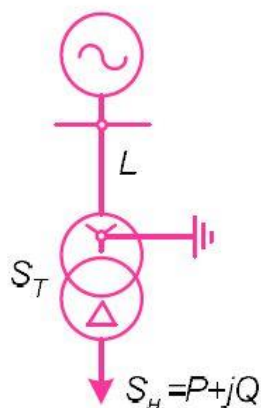


Рисунок 3– Схема установки



**Решение:** Определяются параметры расчетной схемы в единицах, приведенных к напряжению стороны НН трансформатора. В соответствии с (2) коэффициент трансформации равен:

$$K = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} \quad (39)$$

$$K = \frac{110}{10,5} = 10,5$$

Рассчитываем приведенные сопротивления прямой и обратной последовательностей ВЛ:

$$x_{л1} = x_{л2} = x \cdot L \cdot \frac{1}{K^2} \quad (40)$$

$$x_{л1} = 0,4 \cdot 150 \cdot \frac{10,5^2}{110^2} = 0,546 \text{ Ом}$$

По формуле нулевой последовательности

$$x_{л0} = 3 \cdot x_{л1} \quad (41)$$

$$x_{л0} = 3 \cdot 0,4 \cdot 0,546 = 1,63 \text{ Ом}$$

по формуле – приведенные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора:

$$x_{T1} = x_{T2} = x_{T0} = \frac{U_X^2}{100} \cdot \frac{U_{HH}^2}{S_T} \quad (42)$$

$$x_{T1} = x_{T2} = x_{T0} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{10,5^2}{80} = 0,144 \text{ Ом}$$

Приведенное сопротивление нагрузки равно:

$$x_H = \frac{U_{HH}^2}{S_H} \quad (43)$$

$$x_H = \frac{10,5^2}{30} = 3,67 \text{ Ом}$$

а сопротивления прямой и обратной последовательностей нагрузки, в соответствии с:

$$x_{H1} = 1,2 \cdot x_H \quad (44)$$

$$x_{H1} = 1,2 \cdot 3,67 = 4,4 \text{ Ом}$$

$$x_{H2} = 0,35 \cdot x_H \quad (45)$$

$$x_{H2} = 0,35 \cdot 3,67 = 1,29 \text{ Ом}$$

Значения полных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательностей, используемых в расчетной схеме по рис. 1, определяются в соответствии с:

$$x_{1\Sigma} = x_{\pi 1} + x_{T1} + x_{H1} \quad (46)$$

$$x_{1\Sigma} = 0,546 + 0,144 + 4,4 = 5,09 \text{ Ом}$$

$$x_{2\Sigma} = x_{\pi 2} + x_{T2} + x_{H2} \quad (47)$$

$$x_{2\Sigma} = 0,546 + 0,144 + 1,29 = 1,98 \text{ Ом}$$

$$x_{0\Sigma} = x_{\pi 0} + x_{T0} \quad (48)$$

$$x_{0\Sigma} = 1,63 + 0,144 + 4,4 = 6,174 \text{ Ом}$$

$$x_{\Delta} = \frac{1}{1/x_{1\Sigma} + 1/x_{2\Sigma} + 1/x_{0\Sigma}} \quad (49)$$

$$x_{\Delta} = \frac{1}{1/5,09 + 1/1,98 + 1/1,77} = 0,79 \text{ Ом}$$

ток предшествующего полнофазного режима:

$$I^H = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}} \quad (50)$$

$$I^H = \frac{30}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 1650 \text{ А}$$

Составляющие тока прямой, обратной и нулевой последовательностей в неполнофазном режиме определяются соответственно:

$$I_1 = I^H \cdot \left( 1 - \frac{x_{\Delta}}{x_{1\Sigma}} \right) \quad (51)$$

$$I_1 = 1650 \cdot \left( 1 - \frac{0,79}{5,09} \right) = 1390 \text{ А}$$

$$I_1 = -I^H \cdot \frac{x_{\Delta}}{x_{2\Sigma}} \quad (52)$$

$$I_1 = -1650 \cdot \frac{0,79}{5,09} = -659 \text{ А}$$

$$I_1 = -I^H \cdot \frac{x_{\Delta}}{x_{0\Sigma}} \quad (53)$$

$$I_1 = -1650 \cdot \frac{0,79}{1,77} = -735 \text{ А}$$

Ток в нейтрале трансформатора и в заземляющем устройстве, приведенный к напряжению 110 кВ, можно определить как:

$$I_{\text{зав}} = 3 \cdot I_0 \cdot \frac{1}{K} \quad (54)$$

$$I_{\text{зав}} = 3 \cdot 735 \cdot \frac{1}{10,5} = 210 \text{ А}$$

Коэффициент обратной последовательности токов рассчитывается:

$$a'_{i2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (55)$$

$$a'_{i2} = \frac{659}{1390} = 0,674$$

По условиям задачи ток в фазе А на стороне ВН трансформатора отсутствует. Модули токов в фазах В и С обмотки ВН равны:

$$|I_B| = |I_C| = \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot \sqrt{a_{2i}^2 - a_{2i} + 1} \quad (56)$$

$$|I_B| = |I_C| = \sqrt{3} \cdot 1390 \cdot \sqrt{0,674^2 - 0,674 + 1} = 2130 \text{ А}$$

Номинальный ток трансформатора на стороне НН составляет:

$$I^n = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{НН}} \quad (57)$$

$$I^n = \frac{80}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 4400 \text{ А}$$

А предельно допустимая величина тока прямой последовательности:

$$I_{1\partial on} = \frac{I_H}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{a_{2i}^2 - a_{2i} + 1}} \quad (58)$$

$$I_{1\partial on} = \frac{I_H}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{0,674^2 - 0,674 + 1}} = 2880 \text{ А}$$

Таким образом, фактическая величина тока прямой последовательности 1390 А составляет менее 50 % , и, следовательно, по условиям загрузки трансформатора рассматриваемый неполнофазный режим допустим.

Для оценки допустимости режима с точки зрения качества напряжения на стороне НН определяются модули линейных напряжений:

$$|U_{ав}| = |U_{св}| = I_1 \cdot x_H \cdot \sqrt{4,32 + 1,25 \cdot a_2 + 0,366 \cdot a_2^2} \quad (59)$$

$$|U_{ав}| = |U_{св}| = 1390 \cdot 3,67 \cdot \sqrt{4,32 + 1,25 \cdot 0,674 + 0,366 \cdot 0,674^2} = 11,8 \text{ кВ}$$

$$|U_{са}| = |I_1 \cdot x_H \cdot (0,606 \cdot a_2 - 2,08)| \quad (60)$$

$$|U_{са}| = |1390 \cdot 3,67 \cdot (0,606 \cdot 0,674 - 2,08)| = 8,55 \text{ кВ}$$

Коэффициент обратной последовательности напряжения равен:

$$\varepsilon_2 = \frac{0,35 \cdot I_2 \cdot x_H}{U_{НН}} \cdot 100 \quad (61)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{0,35 \cdot 659 \cdot 3,67}{10,5} \cdot 100 = 8,05\%$$

Что недопустимо.

Как показывают расчеты, при заданном условиях задачи режиме для выравнивания несимметрии необходима установка батареи статических конденсаторов.

Потребный ток компенсации батареи, обеспечивающий снижение коэффициента обратной последовательности до допустимой величины, определяем:

$$I_k = I_2 - 0,058 \cdot \frac{U_n}{x_n} \quad (62)$$

$$I_k = 659 - 0,058 \cdot \frac{10500}{3,67} = 483 \text{ А}$$

Емкость батареи:

$$C_3 = \frac{I_k}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_n} \quad (63)$$

$$C_3 = \frac{483}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 10500} = 1,47 \cdot 10^{-4} \text{ Ф} = 147 \text{ мкФ}$$

Величина коэффициента обратной последовательности тока при наличии батареи конденсаторов:

$$a_2' = 0,058 \cdot \frac{U_n}{x_n \cdot I_1} \quad (64)$$

$$a_2' = 0,058 \cdot \frac{483}{3,67 \cdot 1390} = 0,012$$

Соответствующие значения линейных напряжений равны:

$$|U_{ab}| = |U_{cb}| = I_1 \cdot x_n \cdot \sqrt{4,32 + 1,25 \cdot a_2' + 0,366 \cdot (a_2')^2} \quad (65)$$

$$|U_{ab}| = |U_{cb}| = 1390 \cdot 3,67 \cdot \sqrt{4,32 + 1,25 \cdot 0,012 + 0,366 \cdot 0,012^2} = 10,6 \text{ кВ}$$

$$|U_{ca}| = |I_1 \cdot x_n \cdot (0,606 \cdot a_2' - 2,08)| \quad (66)$$

$$|U_{ca}| = |1390 \cdot 3,67 \cdot (0,606 \cdot 0,674 - 2,08)| = 10,25 \text{ кВ}$$

### 4.3 Анализ неполнофазного режима линий на примере Приморских сетей

В качестве объекта исследования были выбраны Приморские электрические сети (ПЭС). По данным ДРСК с 2007 по 2017 наибольшее количество переводов в неполнофазный режим было выявлено на линиях 110 кВ, связывающие ПС Глубинная - ПС Восток, Тимофеевка-Ольга.

Таблица 1–Количество переводов линий ПЭС в неполнофазный режим

ПЭС	Число переводов с 2007 по 2017г.
Рошино-Восток	2
Горбуша-Пластук	1
Рошино-Глубинная-Восток	1
К-Богополь-Ракушка-Тимофеевка-Ольга	5
Плавазавод-Горбуша-Пластук	1
Глубинная-Восток	5
Иман-Новопокровка	1
ПаГРЭС-Находка-тяга	1

#### 4.3.1 Расчет неполнофазного режима на линии ПС Глубинная - ПС Восток

Линия, связывающая подстанции, сделана из провода марки АЖ - 120/77,104.

А - Алюминиевая токопроводящая жила Ж - Провод скручен из проволок термообработанного алюминиевого сплава АВЕ. Предназначен для передачи электрической энергии в воздушных электрических сетях в атмосфере воздуха I и II при условии содержания сернистого газа не более 150 мг/м<sup>2</sup>\*сут (1,5 мг/м<sup>3</sup>) на суше всех макроклиматических районов по ГОСТ 15150 исполнения УХЛ, кроме ТВ и ТС.

Таблица 2 – Линии электропередачи на рассматриваемом участке сети

Наименование линии	U <sub>НОМ</sub> , кВ	Сечение линии	Длина линии, км	Тип линии

Восток – Глубинная	110	АЖ -120.	77,104	ВЛ
--------------------	-----	----------	--------	----

Таблица 3 – Распределение ЛЭП по классам номинального напряжения

$U_{НОМ}$ , кВ	Суммарная протяженность, км
110	77,104

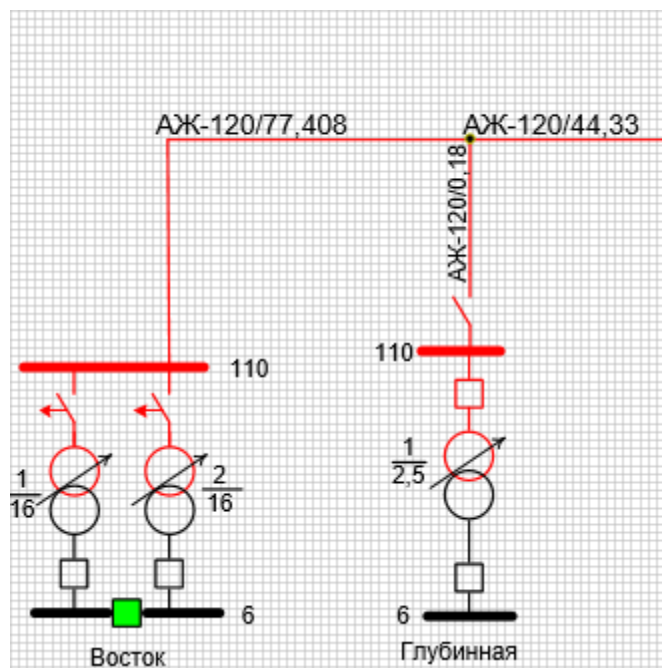


Рисунок 4- Однолинейная схема ПС Глубинная – ПС Восток

По данным таблицы 1 линия АЖ-120/77,408 переводилась в неполнофазный режим 5 раз за 10 лет.

От ПС Восток питается участки потребителей второй категории: ОАО «Приморский ГОК», Школа №12, Детский сад. Поэтому длительный перерыв питания нежелателен.

Проведем проверку данного несимметричного режима



Таблица 4 – Данные участка сети

Длина линии L, км	Мощность трансформатора S <sub>т</sub> , МВА	Нагрузка трансформатора на НН S <sub>нн</sub> , МВА	Напряжение КЗ U <sub>кз</sub> , %	Удельное индуктивное сопротивление X, Ом/км	Схема соединения трансформатора
77,284	2,5	1,25	10,5	0,427	Y/Δ

Подробный расчет показан в приложении А.

Таким образом, фактическая величина тока прямой последовательности 0,637 кА составляет менее 50 % , и, следовательно, по условиям загрузки трансформатора рассматриваемый неполнофазный режим допустим. .

Как показывают расчеты, при заданных условиях задачи режима для выравнивания несимметрии необходима установка батареи статических конденсаторов.

#### 4.3.2 Расчет неполнофазного режима на линии ПС Тимофеевка - ПС Ольга

Линия, связывающая подстанции, сделана из провода марки АС - 95/20,8..

А - Алюминиевая токопроводящая жила С - Стальной сердечник 95 - диаметр жилы. Провод АС используется повсеместно на территории нашей страны во время прокладки воздушных линий. Он обладает достаточно простой конструкцией и оптимальными характеристиками.Срок службы составляет 45 лет и более. Поэтому он и получил активно применение на территории нашей страны.По данным таблицы 1 линия АЖ-120/77,408 переводилась в неполнофазный режим 5 раз за 10 лет.

Проведем проверку данного несимметричного режима по алгоритму, описанном в пункт 2.2.

1. Рабочая температура от -60 до +40 градусов;

2. Сопротивление при температуре 20 градусов не должно превышать 0,0283;

3. Токопроводящая жила выполнена из алюминия, она является многопроволочной;

4. Максимальная температура нагрева составляет 90 градусов.

Провод марки АС производится специально для передачи электрической энергии воздушным путем 1 и 2 типа. Во время его использования стоит помнить о том, что содержание сернистого газа не должно быть выше 150 мг/м<sup>2</sup>. Устанавливать проводник можно во время макроклиматических районах, кроме ТВ и ТС, о чем сейчас сообщает ГОСТ.

Таблица 5 – Линии электропередачи на рассматриваемом участке сети

Наименование линии	U <sub>НОМ</sub> , кВ	Сечение линии	Длина линии, км	Тип линии
Тимофеева - Ольга	110	АС -95.	20,8	ВЛ

Таблица 6 – Распределение ЛЭП по классам номинального напряжения

U <sub>НОМ</sub> , кВ	Суммарная протяженность, км
110	20,8

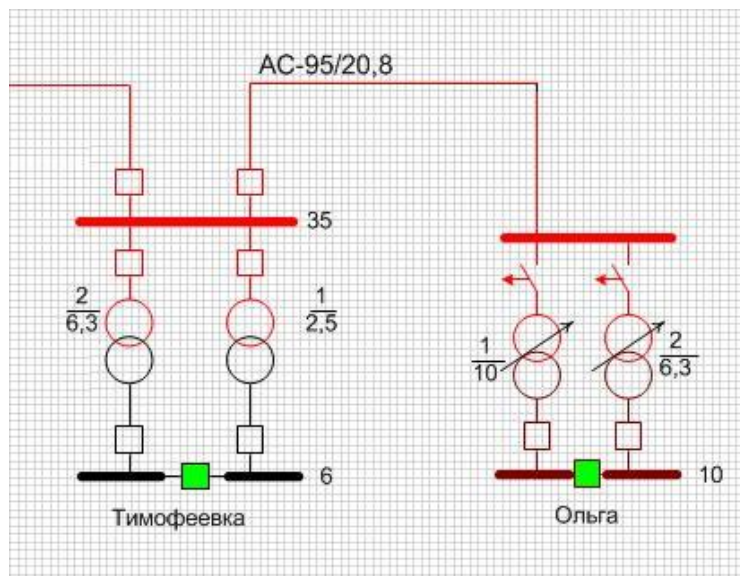


Рисунок 5– Участок сети ПС Тимофеевка - ПС Ольга

По данным таблицы 1 линия АС-95/20,8 переводилась в неполнофазный режим 5 раза 10 лет.

ПС Ольга питается участки потребителей второй категории, поэтому длительный перерыв питания нежелателен.

Проведем проверку данного несимметричного режима по алгоритму, описанном в пункте 2.2.

Таблица 7– Данные участка сети

Длина линии L, км	Мощность трансформатора $S_T$ , МВА	Нагрузка трансформатора на НН $S_{НН}$ , МВА	Напряжение КЗ $U_{КЗ}$ , %	Удельное индуктивное сопротивление $X$ , Ом/км	Схема соединения трансформатора
20,8	10	5	10,5	0,434	Y/Δ

Подробный расчет неполнофазного режима для данного участка сети представлен в приложении Б.

Таким образом, фактическая величина тока прямой последовательности 0,241 А составляет менее 50 % , и, следовательно, по условиям загрузки трансформатора рассматриваемый неполнофазный режим допустим. Так же, как и в пункте 4.3.2 при заданном условиями задачи режиме для выравнивания несимметрии необходима установка батареи статических конденсаторов.

## 5 НАВЕДЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ. ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ ПОД НАВЕДЕННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

При переводе в неполнофазный режим фазу линии выводят в ремонт. В это время на фазе возникает наведенное напряжение.

Наведенным напряжением называется разность потенциалов между проводящими частями электроустановок (ВЛ или оборудования ПС) и точкой нулевого потенциала, возникающая в результате воздействия электрического и магнитного полей, создаваемых расположенными вблизи электроустановками, находящимися под напряжением. Электрическое поле характеризуется электростатической составляющей, зависящей от напряжения влияющих ВЛ и емкостных связей рассматриваемых ВЛ, и электромагнитной составляющей, зависящей от тока во влияющих ВЛ, расстояний между отключенной и влияющими ВЛ, длин и конфигурации участков сближения и параметров контура протекания тока.

Наводка напряжения на линиях воздушной электропередачи возникает не так уж редко. Это наведенное напряжение также возникает в бытовых условиях и в электроустановках, связанных с линиями электропередач. Это явление создает такую же опасность для жизни человека, как и рабочее напряжение. Для того, чтобы правильно защитить себя от такого опасного явления, необходимо рассмотреть природу его появления.

### **5.1 Причины возникновения наведенного напряжения**

Наведенное напряжение может появиться на воздушной линии электропередач, которая выведена в ремонт и отключена от питания, из-за воздействия на нее находящейся рядом действующей электроустановки, либо другой линии под напряжением. Действие оказывает не сама линия или электроустановка, а их электромагнитное поле.

Наведенное напряжение на линии электропередач разделяется по видам воздействия:

а) Электромагнитная часть. Возникает вследствие воздействия магнитного поля, появляющегося от течения электрического тока по действующей линии электропередач. Особенностью и отличием такой составляющей является фактор того, что при заземлении линии в разных нескольких местах, электромагнитное влияние не исчезает и ее величина остается прежней. Влияет разве что нахождение точки нулевого потенциала.

в) Электростатическая составляющая. Она отличается от электромагнитной тем, что исчезает путем подключения заземления на краях линии и в месте производства работы. Уменьшить значение наведенного напряжения можно путем заземления одной точки линии.

Разберемся, отчего возникает наводка, и каков его принцип действия. На рисунке 5 изображен проводник А-А. При прохождении по нему переменного тока образуется электромагнитное поле, действие которого снижается по мере удаления от провода.

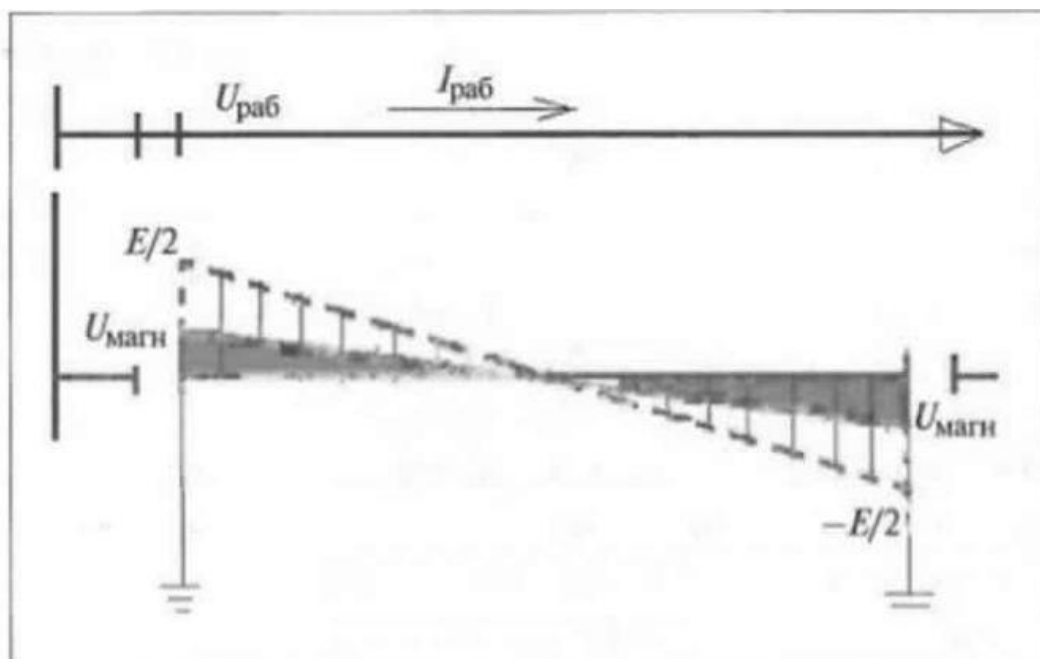


Рисунок 6 -Значение напряжения между заземляющими ножами

Пульсации электромагнитного поля также изменяются при изменении величины электрического тока и его направления. Если в это поле попадает другой проводник, то в нем возникает наводка.

Необходимо определить, какая величина напряжения будет опасной для человека, обслуживающего линию электропередач. Принято считать, что наличие на отключенной воздушной линии наведенного напряжения не более 25 вольт, предполагает применение защитных мер обычного использования.

Если это значение будет превышено, то требуются специальные средства безопасности и осуществление мероприятий, создающих необходимую степень защиты от опасного действия потенциала напряжения. Такими мерами являются отключение заземления по концам линии, подключение заземления на рабочем участке воздушной линии, а также возможен разрез проводника на отдельные части.

Опасность наведенного напряжения.

Это явление считается более опасным и уникальным в отличие от действующего рабочего напряжения, ввиду того, что защитные устройства на него не действуют. Если электромонтер попадет под наведенное напряжение, то под его действием он будет находиться, пока не освободится от него. А при воздействии рабочего напряжения срабатывает устройство защиты и электричество автоматически отключается.

При коротком замыкании на действующей линии осуществляется наводка на обесточенную линию, и наведенное напряжение возрастает в несколько раз. Это оказывает опасное воздействие на ремонтный персонал, работающий на обесточенной линии передач. Последствия таких наведений напряжения бывают очень серьезными: сильные ожоги тела, поражения током важных органов, летальные исходы. Поэтому необходимо соблюдать правила безопасности при работах на выключенных линиях электропередач.

Наведенное напряжение может достигать несколько десятков киловольт. Иногда приходится работать одновременно в нескольких местах. При работе с вышки, ее обязательно необходимо заземлить, при этом нельзя

забывать о выравнивании потенциала провода заземления и корзины вышки, с которой производится работа. При заземлении линии по ее концам, на участке работы напряжение может превысить допустимую величину, так как нулевой потенциал сместится в точку между заземлениями. Если возникла необходимость работы на линии в нескольких местах, то вся линия должна быть разделена на отдельные участки, электрически не связанные между собой. На таком участке можно приступить к ремонту, заземлившись в одной лишь точке.

## **5.2 Действие персонала при наведенном напряжении**

Для гарантии безопасности необходимо устанавливать на рабочем месте два заземления. Случится что-нибудь с одним заземлением – подстрахует второе. Это особенно необходимо, если предстоит разъединить провод. До разъединения провода заземление следует устанавливать с обеих сторон от места предполагаемого разрыва с обязательным подсоединением их к одному заземлению.

Теперь можно разъединить шлейф, не опасаясь, что замкнете на себя уравнивающий ток между концами провода. Заземлив линию в единственной точке на участке только на месте работы, можете быть уверены, что вашей жизни ничто не угрожает.

Нельзя забывать об основных мерах безопасности при осуществлении различных измерений на линии. Соединительные провода, вольтметр и рама разъединителя могут быть под напряжением, поэтому для безопасности необходимо перед измерением собрать схему измерений, а потом уже подключать ее к проводникам фаз.

Соединительные проводники должны иметь изоляцию, которая рассчитана на минимальное напряжение 1 кВ. Работники должны находиться в диэлектрических перчатках и ботах. Если при измерении напряжения будет нужно изменить пределы шкалы прибора, то сначала отключают от напряжения всю схему измерений от воздушной линии.

### **5.3 Правила по охране труда при работе под наведенным напряжением**

Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок распространяются на работников из числа электротехнического, электротехнологического и неэлектротехнического персонала, а также на работодателей (физических и юридических лиц, независимо от форм собственности и организационно-правовых форм, занятых техническим обслуживанием электроустановок, проводящих в них оперативные переключения, организующих и выполняющих строительные, монтажные, наладочные, ремонтные работы, испытания и измерения). [Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (приложение к приказу Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013г.)].

Обязанности по обеспечению безопасных условий и охраны труда возлагаются на работодателя. Представляем краткий анализ основных отличий правила по охране труда при эксплуатации электроустановок от Межотраслевые правила по охране труда (правил безопасности) при эксплуатации электроустановок (ПОТЭУ от МПБЭЭ). Остановимся только на ряде ключевых изменений. По всему тексту новых Правил заменили: «персонал» на «работник»; ссылки на ГОСТы, конкретные нормативные документы на «в соответствии с действующими нормативными документами»; к слову «организация» сразу же добавляется слово «обособленное подразделение»; в выражении «Норм и Правил» оставлены только «Правила»; слово «можно» на «имеет право»; слово «допускается» на «разрешается»; слово «не допускается» на «запрещено»; слово «меры» на «мероприятия»; слово «должен» на «обязан»; исключили раздел «термины и определения», но большинство терминов и определений включили непосредственно в текст Правил; нумерация стала возрастающей по главам (разделы убрали).

Дополнительно внесли изменения в пп. 2.1, 2.2: работники обязаны проходить обучение безопасным методам и приемам выполнения работ в



электроустановках. Работники, занятые на тяжелых работах и на работах с вредными и (или) опасными условиями труда (в том числе на подземных работах), а также на работах, связанных с движением транспорта, должны проходить обязательные предварительные (при поступлении на работу) и периодические (для лиц в возрасте до 21 года ежегодные) медицинские осмотры (обследования) для определения пригодности этих работников для выполнения поручаемой работы и предупреждения профессиональных заболеваний.

Исключена форма журнала присвоения первой группы неэлектротехническому персоналу.

В соответствии с новыми Правилами результаты проверки знаний по охране труда в организациях электроэнергетики оформляются протоколом проверки знаний правил работы в электроустановках, форма которого предусмотрена приложением № 8 к Правилам, и учитываются в журнале учета проверки знаний правил работы в электроустановках, форма которого предусмотрена приложением № 7 к Правилам.

Результаты проверки знаний по охране труда для потребителей электроэнергии фиксируются в журнале учета проверки знаний правил работы в электроустановках, форма которого предусмотрена приложением № 6 к Правилам.

Рассмотрим более подробно, что же изменено по всему тексту новых Правил.

В соответствии с новыми Правилами в технически исправном состоянии, обеспечивающем безопасные условия труда, должны быть не только сами электроустановки, но и машины, аппараты, линии и вспомогательное оборудование (вместе с сооружениями и помещениями, в которых они установлены), предназначенные для производства, преобразования, трансформации, передачи, распределения электрической энергии и преобразования ее в другой вид энергии (далее — электроустановки).

Ответственность за состояние охраны труда в организации несет работодатель. Как и в предыдущих правилах, он вправе передать свои права и функции по этому вопросу руководящему работнику организации. Инновацией является то, что этот работник должен быть наделен в установленном порядке соответствующими административными функциями (главный инженер, вице-президент, технический директор, заместитель директора), Также вправе передать свои права руководителю филиала, руководителю представительства организации (далее — обособленное подразделение).

Необходимо отметить, что согласно новым Правилам Требования, установленные для электротехнического персонала, являются обязательными и для электротехнологического персонала. Соответственно, все требования по подготовке, обучению и проверке знаний, предъявляемых электротехническому персоналу, обязательные и в отношении электротехнологического.

В Правилах определен перечень специальных работ. К ним относятся:

- работы, выполняемые на высоте более 5 м от поверхности земли, перекрытия или рабочий настил, над которым производятся работы непосредственно с конструкций или оборудования при их монтаже или ремонте с обязательным применением средств защиты от падения с высоты (далее — верхолазные работы);

- работы без снятия напряжения с электроустановки, выполняемые с прикосновением к первичным токоведущим частям, находящимся под рабочим напряжением, или на расстоянии от этих токоведущих частей менее допустимого (далее — работы под напряжением на токоведущих частях);

- испытания оборудования повышенным напряжением (за исключением работ с мегаомметром);

- работы, выполняемые со снятием рабочего напряжения с электроустановки или ее части с прикосновением к токоведущим частям, находящимся под наведенным напряжением более 25 В на рабочем месте или

на расстоянии от этих токоведущих частей менее допустимого (далее — работы под наведенным напряжением).

### **Охрана труда при оперативном обслуживании и осмотрах электроустановок.**

Оперативные переключения должны выполнять работники, осуществляющие оперативное управление и обслуживание электроустановок (осмотр, оперативные переключения, подготовка рабочего места, допуск и надзор за работающими, выполнение работ в порядке текущей эксплуатации) (далее — оперативный персонал), или работники, специально обученные и подготовленные для оперативного обслуживания в утвержденном объеме закрепленных за ним электроустановок (далее — оперативно-ремонтный персонал), допущенные к работам ОРД организации или обособленного подразделения.

При оперативном обслуживании, осмотрах электроустановок, а также выполнении работ в электроустановках не допускается приближение людей, гидравлических подъемников, телескопических вышек, экскаваторов, тракторов, автопогрузчиков, бурильно-крановых машин, выдвигаемых лестниц с механическим приводом (далее — механизмы) и технических устройств циклического действия для подъема и перемещения груза (далее — грузоподъемных машин) к находящимся под напряжением неогражденным токоведущим частям на расстояниях, менее указанных в таблице № 1 Правил.

При несчастных случаях для освобождения пострадавшего от действия электрического тока напряжение должно быть снято немедленно без предварительного разрешения оперативного персонала.

Отключать и включать электрические аппараты, предназначенные для коммутации электрической цепи и снятия напряжения с части электроустановки (выключатель, выключатель нагрузки, отделитель, разъединитель, автомат, рубильник, пакетный выключатель, предохранитель) (далее — коммутационные аппараты), и заземлители (заземляющие

разъединители, заземляющие ножи) напряжением выше 1000 В с ручным приводом необходимо в диэлектрических перчатках.

Под напряжением и под нагрузкой допускается заменять: предохранители в цепях управления, электроавтоматики, блокировки, измерения, релейной защиты, контроля и сигнализации (далее — вторичные соединения или цепи); предохранители трансформаторов напряжения; предохранители пробочного типа.

### **Охрана труда при производстве работ в действующих электроустановках.**

Работы в действующих электроустановках должны проводиться: по заданию на производство работы, оформленному на специальном бланке установленной формы и определяющему содержание, место работы, время ее начала и окончания, условия безопасного проведения, состав бригады и работников, ответственных за безопасное выполнение работы (далее — наряд-допуск, наряд), форма которого и указания по его заполнению предусмотрены приложением № 7 к Правилам; по распоряжению; на основании перечня работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации.

Не допускается самовольное проведение работ в действующих электроустановках, а также расширение рабочих мест и объема задания, определенных нарядом, распоряжением или утвержденным работодателем перечнем работ, выполняемых в порядке текущей эксплуатации.

Выполнение работ в месте проведения работ по другому наряду должно согласовываться с работником, выдавшим первый наряд (ответственным руководителем или производителем работ).

Работы на линиях под наведенным напряжением (отключенных ВЛ, воздушных линиях связи (далее — ВЛС), на линиях для передачи электроэнергии, состоящих из участков в воздушном и кабельном исполнении, соединенных между собой (далее — КВЛ), которые проходят по всей длине линии или на отдельных участках вблизи ВЛ напряжением 6 кВ и выше или вблизи контактной сети электрифицированной железной дороги

переменного тока, находящихся под рабочим напряжением, на проводах (тросах) которых при различных схемах их заземления (а также при отсутствии заземлений) при наибольшем рабочем токе влияющих ВЛ наводится напряжение более 25 В, а также всех ВЛ, сооруженных на двухцепных (многоцепных) опорах при включенной хотя бы одной цепи напряжением 6 кВ и выше (далее — ВЛ под наведенным напряжением), выполняются по ППР на выполняемую работу по наряду-допуску.

При приближении грозы должны быть прекращены все работы на ВЛ, ВЛС, ОРУ, на вводах и коммутационных аппаратах ЗРУ, непосредственно подключенных к ВЛ, на линиях для передачи электроэнергии или отдельных импульсов ее, состоящих из одного или нескольких параллельных кабелей с соединительными, стопорными и концевыми муфтами (заделками) и крепежными деталями, на маслонаполненных кабельных линиях с подпитывающими аппаратами и системой сигнализации давления масла (далее – КЛ), подключенных к участкам ВЛ, а также на вводах ВЛС в помещениях узлов связи и антенно-мачтовых сооружениях.

#### **Ограждение рабочего места, вывешивание плакатов безопасности.**

В электроустановках должны быть вывешены плакаты «Заземлено» на приводах разъединителей, отделителей и выключателей нагрузки, при ошибочном включении которых не исключается подача напряжения на заземленный участок электроустановки, на ключах и кнопках дистанционного управления коммутационными аппаратами. При дистанционном управлении с АРМ знак плаката «Заземлено» отображается на схеме у символов коммутационных аппаратов.

Для временного ограждения токоведущих частей, оставшихся под напряжением, должны применяться щиты, ширмы, экраны, изготовленные из изоляционных материалов.

#### **Охрана труда при выполнении работ на воздушных линиях.**

В этой части остановимся на требованиях по охране труда при работах на ВЛ под наведенным напряжением.

Работники, обслуживающие ВЛ, должны иметь и знать перечень линий, находящихся после отключения под наведенным напряжением выше 25 В, в котором должны быть указаны значения наведенного напряжения на отключенных проводах ВЛ, а также на проводах при различных схемах заземления ВЛ стационарными заземлителями (заземляющими разъединителями, заземляющими ножами) в РУ.

Значение наведенного напряжения на рабочем месте (участке ВЛ или подстанционном оборудовании присоединения ВЛ) в зависимости от схемы заземления ВЛ в РУ и наличия электрической связи между заземлением в РУ и рабочим местом должно быть записано в строке «Отдельные указания» наряда.

Измерения (расчеты) значений наведенного напряжения на ВЛ (участках ВЛ) необходимо проводить в местах возможного максимального значения наведенного напряжения (пересечения, сближения, расхождения ВЛ, параллельного следования и пр.).

Все виды работ на ВЛ (участках линий) под наведенным напряжением более 25 В при заземлении ВЛ в РУ или отсутствии электрической связи рабочего места с РУ, связанные с прикосновением к проводу (грозозащитному тросу), проводящим частям машин, механизмов, такелажу должны выполняться по технологическим картам или ППР, предусматривающим отключение и заземление ВЛ во всех РУ и у секционирующих коммутационных аппаратов, где отключена линия с заземлением проводов всех фаз (грозозащитных тросов), на рабочих местах каждой бригады и выполнением одного или нескольких следующих мероприятий для обеспечения безопасного производства работ:

- уравнивание и выравнивание потенциалов путем заземления проводов (грозозащитных тросов), а также применяемых машин, такелажа, приспособлений и механизмов, в том числе рабочих площадок подъемников (вышек) на один заземлитель;

- использование электрозащитных средств в зависимости от величины наведенного напряжения (диэлектрические перчатки, штанги, специальные изолирующие устройства и инструмент);

- применение комплектов для защиты от наведенного напряжения.

Установка и снятие заземления на рабочем месте ВЛ под наведенным напряжением осуществляется после ее заземления в РУ стационарными заземляющими ножами, а на электрически не связанных с РУ участках ВЛ (при монтаже, демонтаже провода, работе в анкерном пролете с рассоединением анкерных петель и пр.) после установки заземлений со всех сторон зоны работ в местах, электрически связанных с рабочими местами и имеющих удаление от места производства работ, для исключения ошибочного или самопроизвольного снятия этих заземлений, ослабления контактов присоединения заземления.

При невозможности обеспечить безопасное производство работ на ВЛ, находящейся под наведенным напряжением, в соответствии с требованиями п. 38.44. Правил разрешается производить работы с выполнением следующих мероприятий:

- выводимая в ремонт ВЛ со стороны РУ не заземляется;

- ВЛ (участок) заземляется только в одном месте (на месте работы бригады) или на двух смежных опорах. При снятии переносных заземлений по окончании работ сначала необходимо отсоединить струбцины заземления от провода (грозотроса) ВЛ, а затем от заземлителя. Допускается работа только с опоры, на которой установлено заземление, или в пролете между смежными заземленными опорами;

- установка (снятие) переносного заземления на рабочем месте производится с помощью изолирующей штанги с дугогасящим устройством или после временного заземления ВЛ в одном из РУ. Заземляющие ножи на конце ВЛ в РУ должны быть отключены только после установки (снятия) заземления на рабочем месте;

- работы производятся с применением комплектов для защиты от наведенного напряжения.

На ВЛ, где на рабочих местах наведенное напряжение выше 25 В, работы с земли, а также работы с заземленных машин и механизмов, металлических и иных проводящих конструкций, в том числе опор ВЛ, связанные с прикосновением к проводу (тросу), опущенному с опоры, должны выполняться с использованием электрозащитных средств в зависимости от значения наведенного напряжения (диэлектрические перчатки, штанги, специальные изолирующие устройства и инструмент) или с металлической площадки, соединенной для уравнивания потенциалов проводником с этим проводом (тросом), или с применением комплекта для защиты от наведенного напряжения. Соединение металлической площадки с проводом (тросом) выполняется гибким проводником сечением не менее 25 мм<sup>2</sup> с применением электрозащитных средств только после расположения на ней работающего.

Запрещается приближение к площадке без применения средств защиты от напряжения шага.

Не разрешается входить в кабину механизма и выходить из нее, а также прикасаться к его корпусу, стоя на земле, после соединения рабочей площадки механизма с проводом.

Запрещается работать с земли без применения электрозащитных средств или без металлической площадки или комплекта для защиты от наведенного напряжения.

**Охрана труда при выполнении работ в электроустановках с применением автомобилей, грузоподъемных машин и механизмов, лестниц.**

Водители, крановщики, машинисты, стропальщики, работающие в действующих электроустановках или в охранной зоне ВЛ, должны иметь группу II.



Проезд автомобилей, грузоподъемных машин и механизмов по территории ОРУ и в охранной зоне ВЛ должен осуществляться под наблюдением одного из работников, имеющего право единоличного осмотра (из числа оперативного персонала, работника, выдавшего наряд, ответственного руководителя), или в электроустановках напряжением до 1000 В — производителя работ, имеющего группу IV, при выполнении строительно-монтажных работ в охранной зоне ВЛ — под наблюдением ответственного руководителя или производителя работ, имеющего группу III. Установка и работа грузоподъемных машин и механизмов в электроустановках должны выполняться под непрерывным руководством и надзором работника, ответственного за безопасное производство работ кранами (подъемниками, вышками), имеющего группу не ниже IV.

#### **Охрана труда при организации работ командированного персонала**

В целом эта часть правил изменилась не особо. Но необходимо отметить, что на ВЛ всех уровней напряжения допускается совмещение ответственным руководителем или производителем работ из числа командированного персонала обязанностей допускающего в тех случаях, когда для подготовки рабочего места требуется только проверить отсутствие напряжения и установить переносные заземления на месте работ без оперирования коммутационными аппаратами.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При работе с научным материалом и рассмотрении примера существующей ситуации в электроэнергетических сетях, была выполнена данная магистерская диссертация на тему "Анализ возможности перевода воздушных линий 110 кВ в неполнофазный режим на примере электрической сети Приморского края".

Ознакомившись с различными источниками литературы, касающихся выбранного направления исследования, можно сказать, что данное направление широко исследуется многими авторами.

Неполнофазный режим может быть использован в электрических сетях во время ремонта поврежденной ВЛ, что существенно повышает надежность электроснабжения. Допустимость такого режима должна оцениваться с учетом:

- не превышения нормированных предельных нагревов силового трансформатора;
- не превышения предельных токовых нагрузок оборудования, установленного в цепи заземленных нейтралей и самих заземляющих устройств;
- сохранения необходимой селективности настройки устройств релейной защиты;
- не превышения предельно допустимых по ПТЭ величин неравенств токов в фазах генераторов и синхронных компенсаторов;
- не превышения предельно допустимых уровней помех на линиях связи и железнодорожной сигнализации, находящихся в зоне влияния данной несимметрично работающей ВЛ. При решении этой задачи проверку заданного несимметричного режима можно ограничить проверкой соблюдения требований ГОСТ 13109-67 и загрузки трансформатора.

В данной работе рассмотрены методы сбора исходных данных, методы обработки результатов и оценка их достоверности для выполнения

магистерской диссертации. Произведен сбор и сравнительная оценка методов решения поставленных задач по теме исследования.

Так же были рассмотрены проблемы электробезопасности работы персонала на высоковольтных воздушных линиях под наведенным напряжением.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дудниченко А.И., Заславская Т.Б., Китушин ВТ. Исследование несимметричных режимов линий электропередачи для повышения надежности электроснабжения// Тр. СибНИИЭ. М.: Энергия, 1974. Вып. 23.
2. Жанаев Д.Т. О целесообразности применения неполнофазных режимов для повышения пропускной способности электропередачи при плановых и аварийных отключениях// Сибирский вестник сельскохозяйственной науки СО ВАСХНИИЛ, 1984. № 1.
3. Жанаев Д.Т., Заславская Т.Б. Линии электропередач с резервной фазой. Издательство Саратовского университета, 1990.
4. Иванов В.С. Соколов В.И. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий. М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Казанцев В.Н., Соболев Л.А. Определение предела передаваемой мощности линии электропередачи в неполнофазном режиме. В сб. труды УПИ им. С.М.Кирова, № 217, Свердловск, 1973.
6. Костенко М.В. Влияние электрических сетей высокого напряжения на техно-и биосферу. Учебное пособие. - Л., изд. ЛПИ, 1984. - 56 с
7. Костенко, М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.Л. Шкарин. - М.: Энергия, 1973. 272 с.
8. Методические указания к практическим занятиям / Сост.: А.Н. Козлов, В.А. Козлов, А.Г. Ротачева. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2013. – 123 с.
9. Методические указания по измерению наведенных напряжений на отключенных ВЛ, находящихся вблизи действующих ВЛ напряжением 35 кВ и выше и контактной сети электрифицированной железной дороги переменного тока./ Министерство топлива и энергетики РФ. Фирма по

наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей ОРГРЭС. Введ.1.07.1993. — 13с.

10. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» Введ. 22.01.2009, — 2008.

11. Методические указания по применению неполнофазных режимов работы основного оборудования электроустановок 330-1150 кВ. Ю.А. Лысков, Н.П. Антонова, О.Ю. Демина и др. РАО «ЕЭС России», СПО ОРГРЭС, 1999.

12. Неудачин, И.А., Афанасенко, А.С., Снопкова, Н. Ю., Разумец, Е. А., Муссонов, Г. П.,— Способ определения величины наведенного напряжения на воздушной линии с двучепными (многоцепными) опорами (варианты).

13. Новые правила по охране труда при эксплуатации электроустановок

14. Перенапряжения при неполнофазных режимах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.websor.ru/perenapr\\_nepolnofaz.html](https://www.websor.ru/perenapr_nepolnofaz.html).

15. Повышение безопасности работ на линиях под наведенным напряжением / А.Н.Данилин, Б.В.Ефимов, О.В.Залесова, В.Н.Селиванов, М.В.Якубович // Труды КНЦ РАН. Энергетика. Вып. 1. – Апатиты: КНЦ РАН, 2010. - С. 91-102.

16. Попов В. А., Якимчук Н. Н. По поводу статьи В. А. Тураева "О наведенных напряжениях на воздушных линиях". // Электрические станции №3, 1998

17. Попов, Н.М. Исследование наведенных напряжений на специальном изолированном проводе для обнаружения аварийных несимметричных режимов в фидерах 10 кВ при «прямом» чередовании фаз [Текст] / Н.М. Попов, С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в

агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 193-197.

18. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (приложение к приказу Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013г.).

19. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (приложение к приказу Министерства труда и социальной защиты РФ от 24 июля 2013 г. N 328н).

20. ПУЭ: правила устройства электроустановок.

21. Сагутдинов, Р.Ш. Исследование и разработка устройства контроля неполнофазных режимов на антенных преобразователях напряжения [Текст] / Р.Ш. Сагутдинов // Труды МИИСП. – Москва: МИИСП, 1978. – Выпуск 5. – С. 107–112.

22. Солдатов, С.В. Наведенные напряжения для обнаружения аварийных несимметричных режимов в фидерах 10 кВ при различных точках расположения изолированного провода [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 221-225.

23. Солдатов, С.В. Расчет наведенных напряжений на проводниках, идущих параллельно линиям электропередач [Текст] / С.В. Солдатов // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: Сборник статей 64-й международной научно-практической конференции. – Кострома, 2013. – Т.1. – С. 217-220.

24. Тураев В.А. О наведённых напряжениях на воздушных линиях // Электрические станции. 1995. № 8. - С.48-53

25. Целебровский Ю.В. Нормативные основы безопасности работ под наведённым напряжением // Энергетик. 2010. № 5. - С. 34-36.

26. Эксплуатация электрических сетей и систем электроснабжения:

27. Ю.И. Лысков, Н.П. Антонова, О.Ю. Демина, В.М. Максимов (департамент электрических сетей рао "еэроссии"); В.М. Лаврентьев, С.В. Бирюков, В.И. Павлов (МЭС центра РАО "ЕЭС России")

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Расчет неполнофазного режима ПС Глубинная - ПС Восток

$$\begin{aligned}U_{ВН} &:= 110 \text{ кВ} & U_{Н} &:= 10500 \\U_{НН} &:= 6 \text{ кВ} \\L &:= 77.104 \text{ км} \\S_{Т} &:= 16 \text{ МВА} \\S_{Н} &:= 8 \text{ МВА} \\U_{кз} &:= 10.5 \% \\x &:= 0.427\end{aligned}$$

Определяются параметры расчетной схемы в единицах, приведенных к напряжению стороны НН трансформатора. В соответствии коэффициент трансформации равен:

$$K := \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = 18.333$$

Рассчитываем приведенные сопротивления прямой и обратной последовательностей ВЛ:

$$x_{л2} := x \cdot L \cdot \frac{1}{K^2} = 0.098 \text{ Ом}$$

$$x_{л1} := x_{л2} = 0.098 \text{ Ом}$$

По формуле нулевой последовательности:

$$x_{л0} := 3 \cdot x_{л1} = 0.294 \text{ Ом}$$

по формуле – приведенные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора:

$$x_{Т0} := \frac{U_{кз}^2}{100} \cdot \frac{U_{НН}^2}{S_{Т}} = 2.481 \text{ Ом} \quad +$$



## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

$$x_{T2} := x_{T0} = 2.481 \text{ Ом}$$

$$x_{T1} := x_{T2} = 2.481 \text{ Ом}$$

Приведенное сопротивление нагрузки равно

$$x_H := \frac{U_{Hn}^2}{S_H} = 4.5 \text{ Ом}$$

а сопротивления прямой и обратной последовательностей нагрузки, в соответствии с

$$x_{H1} := 1.2 \cdot x_H = 5.4 \text{ Ом}$$

$$x_{H2} := 0.35 \cdot x_H = 1.575 \text{ Ом}$$

Значение полных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности, используемых в расчетной схеме, определяются в соответствии с:

$$x_{1\Sigma} := x_{L1} + x_{T1} + x_{H1} = 7.979 \text{ Ом}$$

$$x_{2\Sigma} := x_{L2} + x_{T2} + x_{H2} = 4.154 \text{ Ом}$$

$$x_{0\Sigma} := x_{L0} + x_{T0} = 2.774 \text{ Ом}$$

Сопротивление  $x_{\Delta}$  рассчитывается по выражению:

$$x_{\Delta} := \frac{1}{\frac{1}{x_{1\Sigma}} + \frac{1}{x_{2\Sigma}} + \frac{1}{x_{0\Sigma}}} = 1.376 \text{ Ом}$$

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Ток предшествующего полнофазного режима:

$$I_H := \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}} = 0.77 \text{ кА}$$

Составляющая тока прямой, обратной и нулевой последовательностей в неполнофазном режиме определяют соответственно:

$$I_1 := I_H \cdot \left( 1 - \frac{x_{\Delta}}{x_{1\Sigma}} \right) = 0.637 \text{ кА}$$

$$I_2 := -I_H \cdot \frac{x_{\Delta}}{x_{2\Sigma}} = -0.255 \text{ кА}$$

$$I_0 := -I_H \cdot \frac{x_{\Delta}}{x_{0\Sigma}} = -0.382 \text{ кА}$$

Ток в нейтрале трансформатора и в заземляющем устройстве, приведенный к напряжению 110 кВ, можно определить как:

$$I_{\text{аз}} := 3 \cdot I_0 \cdot \frac{1}{K} = -0.062 \text{ кА}$$

Коэффициент обратной последовательности токов рассчитывается:

$$\alpha_2 := \frac{I_1}{I_2} = -2.497$$

$$\alpha_{i2} := \alpha_2 = -2.497$$

Ток в фазе А на стороне ВН трансформатора отсутствует. Модули токов в фазах В и С обмотки ВН равны:

$$I_B := \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\alpha_{i2}^2 - \alpha_{i2} + 1} = 3.442 \text{ кА}$$

$$I_C := \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\alpha_{i2}^2 - \alpha_{i2} + 1} = 3.442 \text{ кА}$$

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Номинальный ток трансформатора на стороне НН составляет:

$$I_{ном} := \frac{S_{н}}{\sqrt{3} \cdot U_{нн}} = 0.77 \text{ кА}$$

А предельно допустимая величина тока нулевой последовательности:

$$I_{доп} := \frac{I_{ном}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\alpha i^2 - \alpha i^2 + 1}} = 0.142 \text{ кА}$$

Таким образом, фактическая величина тока прямой последовательности 1390 А составляет менее 50 % , и, следовательно, по условиям загрузки трансформатора рассматриваемый неполнофазный режим допустим.

Для оценки допустимости режима с точки зрения качества напряжения на стороне НН определяются модули линейных напряжений :

$$U_{ав} := I_1 \cdot x_{н} \cdot \sqrt{4.32 + 1.25 \cdot \alpha^2 + 0.366 \cdot \alpha^2} = 5.348 \text{ кВ}$$

$$U_{св} := U_{ав} = 5.348 \text{ кВ}$$

$$U_{са} := I_1 \cdot x_{н} \cdot (0.606 \cdot \alpha^2 - 2.08) = -10.3 \text{ кВ}$$

Коэффициент обратной последовательности напряжения равен:

$$\epsilon_2 := \frac{(0.35 \cdot I_2 \cdot x_{н})}{U_{нн}} \cdot 100 = -6.696 \%$$

Что не допустимо.

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

Как показывают расчеты, при заданном условиями задачи режиме для выравнивания несимметрии необходима установка батареи статических конденсаторов.

Потребный ток компенсации батареи, обеспечивающий снижение коэффициента обратной последовательности до допустимой величины, определяем:

$$I_k := I_2 - 0.058 \cdot \frac{U_H}{X_H} = -135.588 \text{ А}$$

Емкость батареи:

$$f := 50$$

$$C_{\Sigma} := \frac{I_k}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_H} = -4.11 \times 10^{-5} \text{ Ф} \quad \text{или} \quad 411 \text{ мкФ}$$

Величина коэффициента обратной последовательности тока при наличии батареи конденсаторов:

$$\alpha_{2оп} := 0.058 \cdot \frac{U_H}{X_H \cdot I_1} = 0.212 \quad 0.212$$

Соответствующее значение линейных напряжений:

$$U_{ав} := I_1 \cdot X_H \cdot \sqrt{4.32 + 1.25 \cdot (0.212) + 0.366 \cdot 0.212^2} = 6.149 \text{ кВ}$$

$$U_{св} := U_{ав} = 6.149 \text{ кВ}$$

$$U_{са} := I_1 \cdot X_H \cdot (0.606 \cdot 0.212 - 2.08) = -5.594 \text{ кВ}$$

$$U_{ав} := I_1 \cdot X_H \cdot \sqrt{4.32 + 1.25 \cdot 0.212 + 0.366 \cdot 0.212^2} = 6.149 \text{ кВ}$$

$$U_{св} := U_{ав} = 6.149 \text{ кВ}$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Расчет неполнофазного режима ПС Тимофеевка - ПС Ольга

$$\begin{aligned}U_{ВН} &:= 110 \text{ кВ} & U_{Н} &:= 10500 \\U_{НН} &:= 10 \text{ кВ} \\L &:= 20.8 \text{ км} \\S_{Т} &:= 10 \text{ МВА} \\S_{Н} &:= 5 \text{ МВА} \\U_{кз} &:= 10.5 \% \\x &:= 0.434\end{aligned}$$

Определяются параметры расчетной схемы в единицах, приведенных к напряжению стороны НН трансформатора. В соответствии коэффициент трансформации равен:

$$K := \frac{U_{ВН}}{U_{НН}} = 11$$

Рассчитываем приведенные сопротивления прямой и обратной последовательностей ВЛ:

$$x_{л2} := x \cdot L \cdot \frac{1}{K^2} = 0.075 \text{ Ом}$$

---

$$x_{л1} := x_{л2} = 0.075 \text{ Ом}$$

По формуле нулевой последовательности:

$$x_{л0} := 3 \cdot x_{л1} = 0.224 \text{ Ом}$$

по формуле – приведенные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей трансформатора:

$$x_{т0} := \frac{U_{кз}^2}{100} \cdot \frac{U_{НН}^2}{S_{Т}} = 11.025 \text{ Ом}$$



## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

$$x_{T2} := x_{T0} = 11.025 \text{ Ом}$$

$$x_{T1} := x_{T2} = 11.025 \text{ Ом}$$

Приведенное сопротивление нагрузки равно

$$x_H := \frac{U_{Hn}^2}{S_H} = 20 \text{ Ом}$$

а сопротивления прямой и обратной последовательностей нагрузки, в соответствии с

$$x_{H1} := 1.2 \cdot x_H = 24 \text{ Ом}$$

$$x_{H2} := 0.35 \cdot x_H = 7 \text{ Ом}$$

Значение полных сопротивлений прямой, обратной и нулевой последовательности, используемых в расчетной схеме, определяются в соответствии с:

$$x_{1\Sigma} := x_{L1} + x_{T1} + x_{H1} = 35.1 \text{ Ом}$$

$$x_{2\Sigma} := x_{L2} + x_{T2} + x_{H2} = 18.1 \text{ Ом}$$

$$x_{0\Sigma} := x_{L0} + x_{T0} = 11.249 \text{ Ом}$$

Сопротивление  $x_{\Delta}$  рассчитывается по выражению:

$$x_{\Delta} := \frac{1}{\frac{1}{x_{1\Sigma}} + \frac{1}{x_{2\Sigma}} + \frac{1}{x_{0\Sigma}}} = 5.792 \text{ Ом}$$

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Ток предшествующего полнофазного режима:

$$I_H := \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{HH}} = 0.289 \text{ кА}$$

Составляющая тока прямой, обратной и нулевой последовательностей в неполнофазном режиме определяют соответственно:

$$I_{1\Sigma} := I_H \cdot \left( 1 - \frac{x\Delta}{x1\Sigma} \right) = 0.241 \text{ кА}$$

$$I_2 := -I_H \cdot \frac{x\Delta}{x2\Sigma} = -0.092 \text{ кА}$$

$$I_{0\Sigma} := -I_H \cdot \frac{x\Delta}{x0\Sigma} = -0.149 \text{ кА}$$

Ток в нейтрале трансформатора и в заземляющем устройстве, приведенный к напряжению 110 кВ, можно определить как:

$$I_{\text{аз}} := 3 \cdot I_0 \cdot \frac{1}{K} = -0.041 \text{ кА}$$

Коэффициент обратной последовательности токов рассчитывается:

$$\alpha_2 := \frac{I_1}{I_2} = -2.609$$

$$\alpha_{i2} := \alpha_2 = -2.609$$

Ток в фазе А на стороне ВН трансформатора отсутствует. Модули токов в фазах В и С обмотки ВН равны:

$$I_B := \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\alpha_{i2}^2 - \alpha_{i2} + 1} = 1.347 \text{ кА}$$

$$I_C := \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot \sqrt{\alpha_{i2}^2 - \alpha_{i2} + 1} = 1.347 \text{ кА}$$

## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Номинальный ток трансформатора на стороне НН составляет:

$$I_{\text{ном}} := \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{НН}}} = 0.289 \text{ кА}$$

А предельно допустимая величина тока нулевой последовательности:

$$I_{\text{доп}} := \frac{I_{\text{ном}}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{\alpha i_2^2 - \alpha i_2 + 1}} = 0.052 \text{ кА}$$

Таким образом, фактическая величина тока прямой последовательности 1390 А составляет менее 50 %, и, следовательно, по условиям загрузки трансформатора рассматриваемый неполнофазный режим допустим.

Для оценки допустимости режима с точки зрения качества напряжения на стороне НН определяются модули линейных напряжений:

$$U_{\text{ав}} := I_1 \cdot x_{\text{Н}} \cdot \sqrt{4.32 + 1.25 \cdot \alpha^2 + 0.366 \cdot \alpha^2} = 9.083 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{св}} := U_{\text{ав}} = 9.083 \text{ кВ}$$

$$U_{\text{са}} := I_1 \cdot x_{\text{Н}} \cdot (0.606 \cdot \alpha^2 - 2.08) = -17.649 \text{ кВ}$$

Коэффициент обратной последовательности напряжения равен:

$$\epsilon_2 := \frac{(0.35 \cdot I_2 \cdot x_{\text{Н}})}{U_{\text{НН}}} \cdot 100 = -6.467 \%$$

Что не допустимо.



## Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

Как показывают расчеты, при заданном условиях задачи режиме для выравнивания несимметрии необходима установка батареи статических конденсаторов.

Потребный ток компенсации батареи, обеспечивающий снижение коэффициента обратной последовательности до допустимой величины, определяем:

$$I_k := I_2 - 0.058 \cdot \frac{U_H}{x_H} = -30.542 \text{ A}$$

Емкость батареи:

$$f := 50$$

$$C_3 := \frac{I_k}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U_H} = -9.259 \times 10^{-6} \text{ Ф} \quad \text{или} \quad 411 \text{ мкФ}$$

Величина коэффициента обратной последовательности тока при наличии батареи конденсаторов:

$$\alpha_{2оп} := 0.058 \cdot \frac{U_H}{x_H \cdot I_1} = 126.33 \quad 0.212$$

Соответствующее значение линейных напряжений:

$$\underline{U_{ав}} := I_1 \cdot x_H \cdot \sqrt{4.32 + 1.25 \cdot (0.212) + 0.366 \cdot 0.212^2} = 10.341 \text{ кВ}$$

$$\underline{U_{св}} := U_{ав} = 10.341 \text{ кВ}$$

$$\underline{U_{са}} := I_1 \cdot x_H \cdot (0.606 \cdot 0.212 - 2.08) = -9.408 \text{ кВ}$$

$$\underline{U_{ав}} := I_1 \cdot x_H \cdot \sqrt{4.32 + 1.25 \cdot 0.212 + 0.366 \cdot 0.212^2} = 10.341 \text{ кВ}$$

$$\underline{U_{св}} := U_{ав} = 10.341 \text{ кВ}$$