

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи



АНОХИН БОРИС АНАТОЛЬЕВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСИММЕТРИИ И УПРАВЛЕНИЕ
ПАРАМЕТРАМИ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В
ПРОТЯЖЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С ТЯГОВОЙ
НАГРУЗКОЙ**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ 05.14.02 –

Электрические станции и электроэнергетические системы

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,

Красильникова Татьяна Германовна

Новосибирск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1 ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ.....	12
1.1 Общие положения	12
1.2 Особенности схем электроснабжения тяговой сети однофазного переменного тока.....	14
1.3 Проблемы качества электроэнергии	21
1.4 Математические модели для расчета несимметричных установившихся режимов в фазных координатах в сетях высокого напряжения.....	24
ГЛАВА 2 МАТРИЧНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННОЙ СЕТИ.....	32
2.1 Общие положения	32
2.2 Матричная модель одноцепной трёхфазной воздушной линии.....	33
2.3 Матричная модель двухцепной трёхфазной воздушной линии.....	36
2.3.1 Нетранспонированная линия.....	36
2.3.2 Идеально-транспонированная линия	39
2.4 Матричная модель шунтирующих элементов.....	46
2.5 Матричная модель автотрансформатора	48
2.6 Эквивалентирование двухцепного участка сети при параллельной работе цепей.....	51
2.7 Эквивалентирование примыкающих систем.....	57
2.8 Преобразование треугольной схемы шестиполюсников в звезду	60
ГЛАВА 3 АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СЕТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ МАГИСТРАЛИ	66
3.1 Исследуемые показатели качества электроэнергии	66
3.2 Матричный метод моделирования сети внешнего электроснабжения ..	67
3.2.1 Описание расчетной схемы.....	67
3.2.2 Алгоритм расчёта режима	71

3.3 Анализ отклонения напряжений и несимметрия в сети внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали	75
3.3.1 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Таксимо	75
3.3.2 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Уоян	79
3.3.3 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Северобайкальск	82
3.4 Общие результаты по главе	85
Глава 4 РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ	87
4.1 Типы компенсирующих устройств и основные положения по выбору их параметров.	87
4.2 Особенности использования компенсирующих устройств в сети 220 и 500 кВ Байкало-Амурской магистрали	96
4.3 Типы симметрирующих устройств и основные положения по выбору их параметров	100
4.4 Анализ эффективности применения симметрирующих устройств для снижения несимметрии в сети внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали	112
4.4.1 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Таксимо ...	112
4.4.2 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Уоян	115
4.4.3 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Северобайкальск	117
Глава 5 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА	121
5.1 Обоснование алгоритма управления параметрами симметрирующего устройства	121
5.2 Управляемые симметрирующие устройства на базе тиристорно–реакторной группы	127
5.3 Управляемые симметрирующие устройства на базе управляемых шунтирующих реакторов с подмагничиванием	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	137
Приложение А Результаты поверочного расчета для участка сети с нелинейной нагрузкой	147
Приложение Б Описание программы «РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА» для расчета показателей качества электроэнергии в протяженной трехфазной электрической сети с несимметричной нагрузкой и определения параметров симметрирующих устройств	150
Приложение В Проверочные расчеты для программы «РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА»	164
Приложение Г Результаты поверочного расчета для участка сети с нелинейной нагрузкой на модели MatLab Simulink	166
Приложение Д Акт об использовании результатов диссертационной работы Анохина Б.А.....	170

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время загрузка железнодорожных магистралей в Сибири и на Дальнем Востоке растет быстрыми темпами. Существующие сети внешнего электроснабжения железных дорог весьма протяжённые, что при значительной неравномерной по фазам тяговой нагрузке приводит к снижению качества электрической энергии.

Так, например, систему электроснабжения западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали образуют две воздушные линии электропередачи 220 кВ протяженностью более 1000 км, что значительно превышает рекомендуемую для ЛЭП данного класса напряжения. В условиях одностороннего питания наличие резкопеременной распределенной тяговой нагрузки, существенно различающейся по фазам, является основной причиной возникновения значительной несимметрии режима в протяженной высоковольтной сети.

Проблема несимметрии решается путем установки симметрирующих устройств в определенных пунктах высоковольтной сети. Симметрирующее устройство (СУ) представляет трехфазный элемент с различными реактивными сопротивлениями по фазам, принимающими как индуктивный, так и емкостной характер в зависимости от конкретного вида несимметрии. Пофазные параметры СУ должны управляться при изменяющемся уровне несимметрии в сети на межпоездном интервале, что требует разработки системы управления параметрами симметрирующего устройства.

Указанные особенности протяженных сетей внешнего электроснабжения железных дорог требуют особого подхода при анализе режимов их работы и должны быть учтены при создании систем управления параметрами симметрирующих устройств. Традиционные методы расчета режимов работы электрических систем, основанные на однолинейных моделях трехфазных цепей, не применимы в данном случае, поскольку

приводят к недопустимым погрешностям. В связи с этим также возникает задача моделирования в трехфазной постановке ЛЭП, трансформаторов, нагрузки и сети в целом для выборе мест установки симметрирующих устройств и разработке систем управления их параметрами.

Планируемый рост электрических нагрузок железных дорог, приводящий к дальнейшему повышению уровня несимметрии в протяженных высоковольтных сетях, говорит об актуальности темы данной работы.

Степень разработанности темы.

Проблемам качества электрической энергии в сетях электроснабжения железных дорог и развитию методов моделирования несимметричных режимов работы этих сетей посвящены работы отечественных ученых: В.П. Закарюкина [1-17], А.В. Крюкова [1-17]. Изучению способов повышения качества и симметрирования напряжения в сетях внешнего электроснабжения посвящены работы А.А. Мининой [18], В.И. Пантелеева [19], А.Г. Машкина [20], Г.В. Рогова [21-24].

Проведенный автором обзор работ показывает, что вопросам качества электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог и анализа несимметричных режимов уделено большое внимание. В тоже время очень важная в методическом и практическом плане проблема аналитического определения параметров симметрирующих устройств и алгоритма управления ими в процессе работы при изменении режима сети является недостаточно изученной.

Объектом исследования являются протяженные сети внешнего электроснабжения железных дорог на примере сети 220 – 500 кВ Байкало-Амурской железной дороги.

Предметом исследования являются вопросы снижения несимметрии в протяженных сетях внешнего электроснабжения железных дорог.

Связь темы диссертации с общенаучными (государственными) программами и плановыми исследованиями. Тема диссертации

соотносится с темой предпроектного обследования по титулу “Установка устройств компенсации реактивной мощности в сети 220 кВ БАМ”, выполненного в 2010 году и технического отчета “Пилотный проект по применению технических средств ААС в системах электроснабжения БАМ и Забайкальской железной дороги” выполненного в 2011 году филиалом АО “НТЦ ФСК ЕЭС” – СибНИИЭ.

Целью работы является разработка системы управления параметрами симметрирующих устройств в протяженных высоковольтных сетях, питающих тяговую нагрузку.

Для достижения поставленной цели поставлены и решены следующие задачи:

- Разработка методики анализа несимметрии в протяженной трёхфазной сети, питающей тяговую нагрузку.
- Анализ несимметрии в протяженной сети (на примере сети 220-500 кВ БАМ) для электроснабжения тяговой нагрузки.
- Определение параметров СУ, обеспечивающих требуемый уровень несимметрии.
- Обоснование алгоритма управления параметрами СУ и рекомендаций по системам автоматического управления симметрирующими устройствами.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников по теме работы, методы теоретических основ электротехники и теории электрических цепей с распределенными параметрами, методы математического моделирования сети на основе теории матриц, а также основы общей теории функционирования электроэнергетических систем.

На защиту выносятся:

1. Анализ несимметрии в протяженной сети с тяговой нагрузкой, различающиеся по фазам, требует решения задачи в трехфазной постановке. Предлагаемые в работе матричные модели элементов сети в фазных

координатах, способы преобразования и эквивалентирования отдельных участков сети и алгоритм расчета несимметрии, основанный на линеаризации тяговой нагрузки, позволяют дать необходимую оценку уровня несимметрии.

2. Пофазные параметры симметрирующего устройства в общем случае зависят от нескольких режимных параметров, а именно модулей и угловых сдвигов всех фазных напряжений, а также от схемы протяженной сети с распределенной тяговой нагрузки. В работе предложен метод определения параметров симметрирующего устройства с использованием комплексных величин фазных напряжений и токов в месте его установки при учете остальной сети обобщенным режимным параметром, который при необходимости может корректироваться.

3. Поддержание допустимого уровня несимметрии в сети в любой момент времени позволяет осуществить предложенный алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства.

4. Предложение по созданию микропроцессорной системы автоматического управления симметрирующим устройством на базе статических тиристорных компенсаторов или с использованием управляемых шунтирующих реакторов является наиболее простым и эффективным путем снижения несимметрии.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается корректным использованием математического аппарата теории волновых процессов в линиях высокого напряжения, обоснованность которой доказана многолетней практикой её применения, а также программной реализацией в среде MatLab разработанной методики анализа несимметрии с использованием двух различных методов, дающих совпадающие результаты.

Научная новизна диссертации заключается в разработке методических основ для определения параметров симметрирующих устройств в протяженной сети 220 кВ, питающей тяговую нагрузку, и

управлению ими на межпоездном интервале. К числу отдельных результатов, полученных впервые, относятся:

- Создание методики расчета несимметрии в протяженной трёхфазной сети, включающей способы моделирования, преобразования и эквивалентирования отдельных участков сети и расчетный алгоритм, основанный на линеаризации тяговой нагрузки.

- Разработка метода для определения параметров СУ.

- Обоснование алгоритма управления параметрами симметрирующих устройств в протяженных высоковольтных системах с тяговой нагрузкой.

Практическая ценность работы состоит в рекомендациях по выбору параметров симметрирующих устройств и созданию систем автоматического управления ими.

К отдельным результатам, представляющим практическую ценность, следует отнести:

- Разработанную программу для анализа несимметрии в протяженной трёхфазной сети, питающей тяговую нагрузку.

- Предложения по выбору типа и параметров СУ.

- Рекомендации по созданию микропроцессорных систем автоматического управления симметрирующими устройствами двух типов: на базе тиристорно-реакторной группы и с использованием управляемых шунтирующих реакторов..

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 05.14.02 - «Электрические станции и электроэнергетические системы»:

п.6. Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике.

п.7. Разработка методов расчета установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем.

п.12. Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению.

Реализация работы. Разработки и рекомендации диссертационной работы, касающиеся снижения несимметрии в протяжённой сети 220 – 500 кВ, питающей тяговую нагрузку, использовались в ПАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Сибири при выборе путей решения проблемы, касающейся повышения качества электроэнергии в системах внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали и Забайкальской железной дороги.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVII международной научно-практической конференции студентов и молодых ученых "Современные техника и технологии" СТТ-2011, г. Томск, 2011 г, а также на международной молодежной научно-технической конференции «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах» НГТУ – Новосибирск, 2011.

Личный вклад автора:

Автором совместно с руководителем выполнены постановка целей и задач исследования. Автором самостоятельно выполнен обзор существующих методов расчета трехфазных электрических сетей, получены соотношения для преобразования двухцепных участков линии к эквивалентным одноцепным и обратно, предложена методика расчета несимметрии в протяженной трехфазной сети, разработан метод определения параметров симметрирующего устройства, предложен алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства.

В работах, опубликованных в соавторстве, автору принадлежит формализация поставленных задач исследований, выбор методов их решения, проведение исследований, анализ и обобщение результатов.

Публикации.

По результатам исследований опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 научных статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в

перечень рекомендованных изданий ВАК РФ; 2 статьи в сборниках международных и всероссийских конференций; 1 статья в сборнике, не входящем в перечень рекомендованных изданий ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы из 88 наименований и пяти приложений. Работа изложена на 170 страницах машинописного текста, который поясняется 86 рисунками и 20 таблицами.

ГЛАВА 1 ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

1.1 Общие положения

Система электрофицированных железных дорог состоит из двух частей [25,26]: внешней части системы электроснабжения, которая включает все устройства от электростанции до линий электропередач, подводящих энергию к тяговым подстанциям; тяговой части системы электроснабжения, которая состоит из тяговых подстанций и тяговой сети. Тяговая сеть состоит из контактной сети, рельсового пути, питающих и отсасывающих линий, а также других проводов и устройств, присоединяемых по длине линии к контактной подвеске непосредственно или через специальные автотрансформаторы.

Устройство тяговой подстанции зависит от системы электрической тяги, применяемой на железной дороге, т.е. определяется родом тока и напряжением, применяемого в контактной сети, а также напряжением и системой тока источника энергии первичной части схемы питания. Наибольшее распространение находят схемы питания при трех системах электрической тяги: постоянного тока, однофазного тока промышленной частоты и однофазного тока пониженной частоты. Остановимся подробнее на системе однофазного тока промышленной частоты 50 Гц, которая используется в России и, в частности, на БАМ (рисунок 1.1).

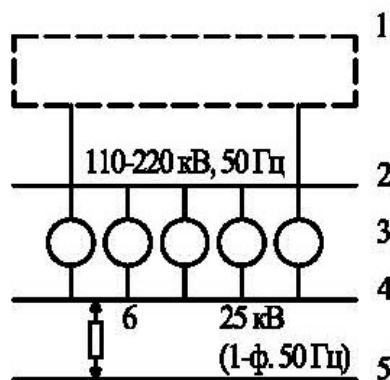


Рисунок 1.1 – Система однофазного тока промышленной частоты 50 Гц, (1 - энергосистема; 2 – линия электропередачи; 3 – тяговые трансформаторные подстанции; 4 – контактная сеть; 5 – рельсы; 6 - электровоз)

Главным достоинством этой системы в сравнении с системой питания на постоянном токе, является возможность применения более высокого напряжения в контактной сети с последующим понижением его на локомотиве.

В России принято напряжение 25 кВ. В таком случае тяговые подстанции являются простыми трансформаторными, а сечение контактных сетей существенно снижается даже при значительных расстояниях между подстанциями (до 50-60 км). Наибольшее распространение получил электроподвижной состав с двигателями постоянного тока и преобразовательной установкой на локомотиве. Трансформаторы в таких установках дают возможность выполнять регулирование напряжения на двигателях под нагрузкой.

Система промышленной частоты дает возможность питать однофазную сеть от трехфазной через трансформатор. Однако, в случае подключения однофазной тяговой нагрузки от трехфазной сети имеет место неравномерная загрузка фаз первичной системы электроснабжения. Несимметричная нагрузка негативно влияет на работу элементов первичной сети (трансформаторов, генераторов, линий, релейной защиты). При питании сети

внешнего электроснабжения от мощных энергосистем тяговая нагрузка составляет незначительную долю от общей нагрузки системы. Однако она приводит к существенной неасимметрии напряжений на шинах тяговых подстанций и в прилегающей сети, которая оказывает негативное влияние на работу трехфазных потребителей, подключенных к этим подстанциям. К недостаткам приведенной системы можно также отнести влияние тяговой сети на слаботочные линии.

1.2 Особенности схем электроснабжения тяговой сети однофазного переменного тока

На железных дорогах однофазного переменного тока контактная сеть, как правило, подключается от трехфазной линии электропередачи через трансформаторы. Самой простой является схема подключения через однофазный трансформатор, изображенная на рисунке 1.2. В таком случае на всей линии справа и слева от подстанции напряжение контактной сети совпадает по фазе с напряжением U_{ab} во внешней сети. Контактная сеть секционируется, это позволяет в случае повреждения отключить только половину питаемой линии. Недостатком схемы является то, что третья фаза линии передачи не используется и остается ненагруженной.

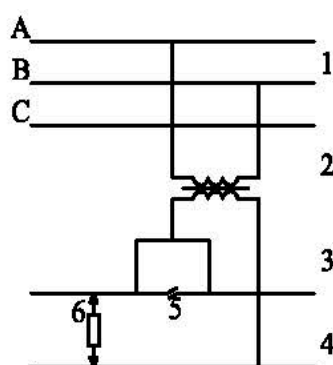


Рисунок 1.2 – Схема питания контактной сети однофазного переменного тока от однофазного трансформатора (1 – трехфазная линия электропередачи; 2 – трансформатор; 3 – контактная сеть; 4 – рельсы; 5 – секционирующее устройство; 6 - электровоз)

Более равномерная загрузка фаз сети внешнего электроснабжения может быть получена при подключении тяговых подстанций поочередно от разных фаз питающей линии. В таком случае секции контактной сети слева и справа от подстанции подключены к разным фазам питающей линии и, имеют напряжения, отличные по фазе.

В сетях электроснабжения железных дорог России распространена схема подключения контактной сети от трехфазных трансформаторов со схемой соединения У/Д. Использование трехфазных трансформаторов дает возможность выполнить подключение трехфазных (нетяговых) потребителей от тяговой подстанции (рисунок 1.3).

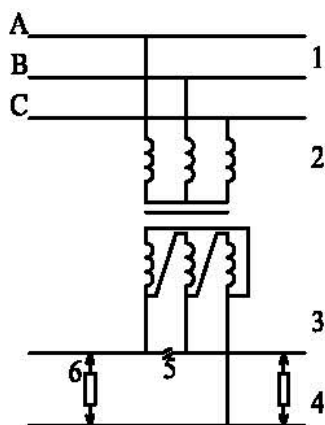


Рисунок 1.3 – Схема подключения контактной сети переменного тока с помощью трехфазного трансформатора, со схемой соединения У/Д (1 – трехфазная линия; 2 – трехфазный трансформатор; 3 – контактная сеть; 4 – рельсы; 5 – устройство секционирования; 6 - электровоз)

Вторичная обмотка трансформаторов соединяется в треугольник, как это показано на рисунке 1.3. Схема соединения первичной обмотки – звезда, следовательно напряжения в контактной сети между контактным проводом и рельсами U_{ac} (слева на рисунке 1.3) и между рельсами и контактным проводом U_{cb} (на рисунке 1.3, справа) соответствуют по фазе с напряжениям первичной стороны U_a и U_c . Схема на рисунке 1.3 является трехфазно-

двухфазной. При применении этой схемы трехфазная система нагружается неравномерно.

Одной из распространенных схем внешнего электроснабжения железных дорог в нашей стране является схема подключения тяговых подстанций от линии передачи 220 – 110 кВ, идущей вдоль железной дороги. В целях снижения несимметрии нагрузки на шинах источника питания и в питающей линии и несимметрии напряжения в сети, наиболее нагруженные фазы тяговых трансформаторов поочередно подключают то к одним, то к другим фазам питающей сети. Порядок чередования определяется в зависимости от схемы соединения обмоток трансформаторов на подстанциях, от схемы внешнего электроснабжения, от длины заданного участка железной дороги, а также от количества и фактического расположения тяговых подстанций относительно источников питания.

Одной из самых простых является схема подключения контактной сети через однофазные трансформаторы (рисунок 1.4). Для снижения неравномерности загрузки фаз трехфазной системы подстанции поочередно присоединяют к разным фазам. Напряжение внешней сети по фазе совпадает с напряжением подключенного участка контактной сети. В данной схеме соединение подстанций через контактную сеть должно быть исключено, в противном случае это приведет к короткому замыканию. Таким образом, каждый участок контактной сети может быть подключен только с одной стороны. В середине участка между тяговыми подстанциями выполняют нейтральную вставку.

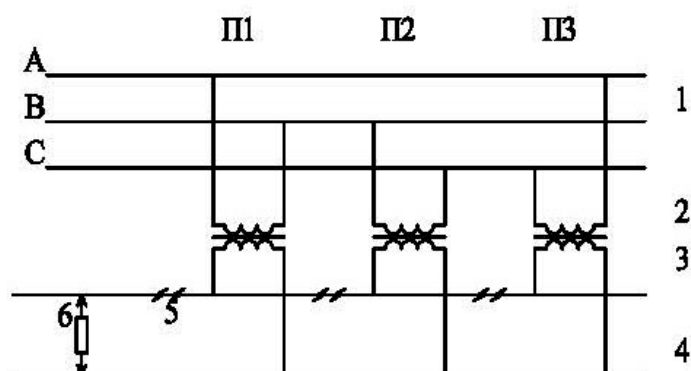


Рисунок 1.4 – Схема подключения участка контактной сети от однофазных трансформаторов (1 – трехфазная линия электропередачи; 2 – трансформатор; 3 – контактная сеть; 4 – рельсы; 5 – секционирующее устройство; 6 - электровоз)

В случае применения трехфазных трансформаторов со схемой соединения Y/Д, схема принимает более сложный вид (рисунок 1.5).

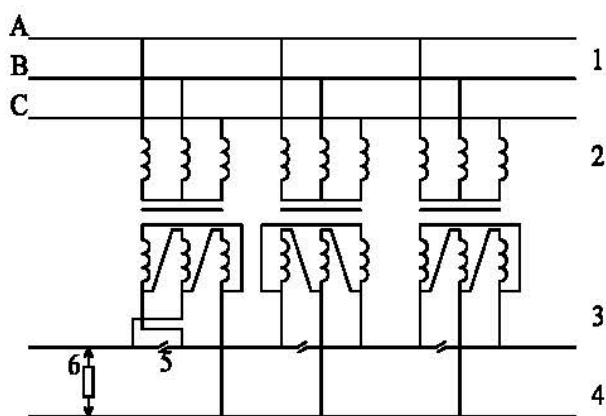


Рисунок 1.5 – Схема подключения участка контактной сети от трехфазных трансформаторов (1 – трехфазная линия электропередачи; 2 – трехфазный трансформатор; 3 – контактная сеть; 4 – рельсы; 5 – секционирующее устройство; 6 - электровоз)

В приведенной схеме схемы соединения трансформаторов на отдельных участках определяются с учетом схем соединения на смежных участках так, чтобы при параллельной работе каждая зона контактной сети в начале и в конце была подключена от одной и той же фазы внешней сети.

В идеальном случае, при равенстве модулей и коэффициентов мощности нагрузок на подстанция, каждые три соседние подстанции, подключенные к фазам АВ, ВС, СА образуют треугольник с симметричной нагрузкой фаз и обеспечивают равномерную нагрузку внешней трехфазной сети.

В реальности подстанции, как правило, размещают на крупных железнодорожных узлах. При этом с учетом рельефа местности (влияет на мощность, потребляемую составом), неравенства участков между подстанциями, а также возможного изменения грузопотока даже средние нагрузки подстанций значительно отличаются. С учетом этих факторов даже при количестве тяговых подстанция кратном трем (или шести для схемы двустороннего питания), равномерная загрузки фаз питающих источников сети внешнего электроснабжения не обеспечивается.

Известно, что при неравномерной нагрузке в трехфазной электрической системе, несимметрия напряжений в большей степени определяется падением напряжений в линиях передач. Падение напряжения зависит от величины нагрузки и размещения подстанций. Таким образом ясно, что при любом присоединении тяговых подстанций к трехфазной питающей линии, получить равные потери напряжения во всех трех фазах не возможно, по причине расположения несимметричной нагрузки на разном удалении от источников питания. Данное положение осложняется получившей распространение на практике схемой питания тяговых подстанций от протяженной двухцепной линии. Тяговые подстанции при этом подключаются поочередно к обеим цепям линии электропередачи, что усиливает несимметрию нагрузки на каждой цепи питающей линии, и

соответственно приводит к несимметрии напряжений на узловых подстанциях сети.

В дополнение необходимо учесть то, что нагрузка тяговых подстанций постоянно меняется в широком диапазоне и нагрузки отдельных тяговых подстанций почти никогда не бывают равными. Из этого следует несмотря на то, что приведенные выше варианты схем питания электрифицированных железных дорог позволяют обеспечить более равномерную загрузку сети внешнего электроснабжения, они не решают проблему несимметрии полностью. На практике проблему несимметрии тока и напряжения необходимо решить с учетом конкретных условий.

Одной из разновидностей схем подключения электрической тяги на переменном токе промышленной частоты является трехпроводная схема контактной сети переменного тока с автотрансформаторами. Отличия этой схемы от предыдущей относятся к системе внешнего электроснабжения (рисунок 1.6). В соответствии с этой схемой на тяговых подстанциях при помощи специальных трансформаторов или автотрансформаторов создается трехпроводная система питания контактной сети с двумя разными или равными напряжениями.

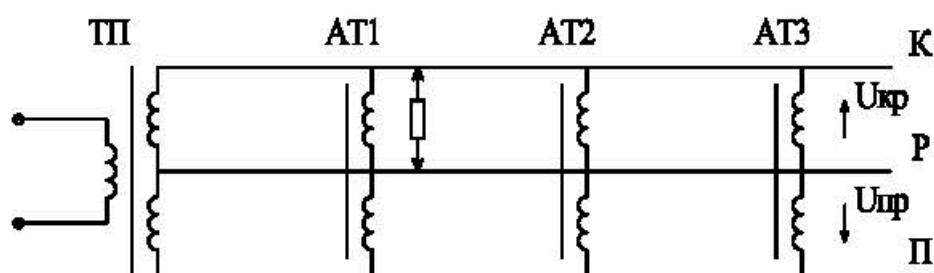


Рисунок 1.6 – Трехпроводная схема питания однофазного тока

В данном случае имеем две системы шин, на которые подаются эти напряжения. Первое напряжение, равное номинальному напряжению локомотива, подключается на систему контактной сети относительно рельса.

Второе напряжение подключается на продольный фидер относительно рельса. Продольный фидер подвешивается на опорах тяговой сети. Вектор второго напряжения противоположно направлен относительно вектора первого напряжения. Соответственно, суммарное напряжение между подвеской контактных сетей и продольным фидером равно сумме модулей этих напряжений, что значительно больше первого напряжения (номинальное напряжение локомотива). В рассматриваемой схеме между тяговыми подстанциями на некотором расстоянии между ними (от 8 до 15 км) размещают автотрансформаторы. Общая (первичная) обмотка автотрансформатора подключается на тяговой подстанции на напряжение между контактной подвеской K и продольным фидером Π , значительно превосходящее напряжение контактной сети.

На электрифицированных железных дорогах в России принята система 2×25 кВ с номинальным напряжением на электропоездах 25 кВ и 27,5 кВ на шинах тяговых подстанций. Суммарное напряжение на первичной стороне автотрансформаторов (1-3), между подвеской контактной сети и питающим продольным фидером при этом равно 50 кВ [25,26].

На обмотках автотрансформаторов, подключенных к рельсам и продольному фидеру, напряжение также равно 25 кВ, и относительно напряжения между рельсами и локомотивом оно также повернуто на 180° . Соответственно данная система и получила название системы 2×25 кВ. Таким образом подключение контактной сети на практически на всей протяженности выполняется по сети с суммарным напряжением (в данном случае около 50 кВ), это позволяет уменьшить потери электроэнергии и напряжения. Также за счет того что провода на большей части участка располагаются достаточно близко, токи в проводах имеют меньшее значение, а токи в рельсах близки к нулю электромагнитное влияние на смежные линии низкого напряжения снижается.

На электрифицированных железных дорогах России при применении данной схемы тяговые подстанции имеют специальные трансформаторы с

двумя вторичными обмотками на напряжение 27,5 кВ. Соединение этих обмоток выполняется последовательно, а средняя точка при этом присоединяется к рельсам.

1.3 Проблемы качества электроэнергии

Электрифицированный железнодорожный транспорт, работающий на однофазном токе, получает питание от энергосистемы, что приводит к неравномерной загрузке трехфазных сетей. В условиях питания однофазной тяговой нагрузки от трехфазных сетей, при принятых в настоящее время схемах подключения контактной сети, практически невозможно добиться равномерного распределения нагрузки по фазам, это приводит к неоптимальному использованию всех элементов трехфазной сети. Несимметричная по фазам нагрузка электрических сетей приводит к разным потерям напряжения в элементах и в результате ведет к появлению несимметрии напряжения в самой сети и у трехфазных потребителей. От систем электроснабжения железных дорог могут получать питание в том числе и нетяговые потребители, такие как трехфазные асинхронные двигатели, ближайшие населенные пункты. Несимметричное напряжение на выводах трехфазных двигателей приводит к необходимости снижать приходящуюся на двигатели нагрузку, а также к неравной загрузке их фаз и соответственно к повышенному нагреву более загруженных фаз. В случае несимметричного напряжения на некоторых однофазных нетяговых потребителях напряжение может значительно превысить номинальное, а на других будет значительно ниже номинального, что приведет соответственно к уменьшению срока службы первых и уменьшению производительности вторых.

Приведенные явления оказывают наибольшее влияние при чисто однофазной нагрузке, то есть в случае питания от трехфазной системы

только однофазной нагрузки. На практике, как правило, к сети подключено большое количество как трехфазных потребителей, так и однофазных. Распределение однофазных потребителей между фазами трехфазной сети обычно стараются выполнить как можно более равномерно. Чем равномернее распределена однофазная нагрузка в энергосистеме и чем меньше ее доля, тем меньше величина несимметрии и тем меньше негативное влияние неполнофазной нагрузки на систему.

Электрическая тяговая нагрузка является однофазной нагрузкой большой мощности. Поэтому проблемам возникающей несимметрии, вызванной в энергосистеме наличием тяговой нагрузки, следует уделять повышенное внимание. Уменьшить несимметрию возможно путем более равномерного распределения однофазной нагрузки между фазами трехфазной сети, а также применением специальных симметрирующих устройств [27-32].

Возникающая в сети несимметрия как правило обусловлена обратной последовательностью. При этом нормально допустимые коэффициенты по обратной последовательности не должны превышать 2%, а предельно допустимое значение коэффициента несимметрии составляет 4% по ГОСТ 32144-2013 [33]. Однофазные приемники электроэнергии несимметрию напряжения воспринимают как отклонение напряжения. Согласно тому же стандарту для таких приемников допускается отклонение напряжения, не выходящее за установленные пределы $\pm 5\%$.

Необходимость ограничения коэффициента несимметрии в электрических сетях связано с негативным воздействием несимметричных токов и напряжений на элементы сети, приводящим к снижению надежности работы электрооборудования и системы электроснабжения в целом.

Негативное влияние несимметрия напряжений оказывает на работу асинхронных двигателей. Для двигателей особое значение имеет наличие напряжения обратной последовательности. Значение сопротивления электродвигателей по обратной последовательности близко к величине

сопротивления заторможенного двигателя. Соответственно сопротивление двигателя по обратной последовательности в 5–8 раз меньше сопротивления прямой последовательности. Таким образом, даже наличие небольшой несимметрии напряжений приводит к появлению значительных токов обратной последовательности в двигателе. Токи обратной последовательности в сумме с токами прямой последовательности приводят к дополнительному нагреву статора и особенно массивных частей ротора. Эти факторы приводят к уменьшению располагаемой мощности двигателя и ускоренному старению изоляции. Например, срок эксплуатации полностью загруженного асинхронного двигателя, при работе в условиях несимметрии напряжения равной 4%, сокращается в 2 раза. При работе в условиях несимметрии напряжения в 5% мощность двигателя уменьшается на (5–10)% [34-38].

В случае наличия несимметрии напряжений на выводах синхронных машин помимо появления дополнительных потерь активной мощности и нагрева элементов статора и ротора, в результате появления знакопеременных вращающих моментов и поперечных сил, с пульсациями двойной частотой сети, могут возникать опасные вибрации ротора. При значительной величине несимметрии вибрация может быть опасной, особенно в случае наличия дефектов сварных соединений и недостаточной прочности машины. В случае если несимметрия токов не превышает 30%, опасные механические напряжения в элементах конструкций, как правило, не возникают.

В соответствии с Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации «Допускается длительная работа с разностью токов в фазах, не превышающей 12% номинального для турбогенераторов и 20% для синхронных компенсаторов и дизель-генераторов. Для гидрогенераторов с системой косвенного воздушного охлаждения обмотки статора допускается разность токов в фазах 20% при мощности 125 МВА и ниже, 15% - при мощности свыше 125 МВА. Для

гидрогенераторов с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора допускается разность токов в фазах 10%». В случае если указанные условия не выполняются, следует принимать специальные меры по снижению несимметрии» [39,40].

Наличие токов обратной последовательности в сети приводит к увеличению суммарных токов в некоторых фазах отдельных элементов, это приводит к увеличению потерь мощности в этих элементах и может быть недопустимо по условию нагрева.

Батареи статических конденсаторов при наличии несимметрии напряжений неравномерно загружаются реактивной мощностью по фазам, в таком случае полное использование номинальной мощности конденсаторной батареи становится невозможным. Более того, батареи статических конденсаторов в таком случае усиливают уже имеющуюся несимметрию в сети. Так выдача реактивной мощности в сеть в фазе с наибольшим напряжением будет больше, а в фазе с наименьшим напряжением меньше, чем в остальных фазах.

Коэффициент несимметрии напряжения вычисляется по следующему выражению:

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

где U_1 и U_2 – действующие значения напряжений прямой и обратной последовательности.

1.4 Математические модели для расчета несимметричных установившихся режимов в фазных координатах в сетях высокого напряжения

Для определения электрических величин в сложно несимметричных режимах целесообразно выполнение расчетов непосредственно в фазных координатах взамен традиционных методов использования симметричных

составляющих, а также различных систем несимметричных составляющих [41-47]. Использование той или другой системы симметричных или несимметричных составляющих сопряжено с необходимостью предусмотреть особые связи, подчас достаточно сложные, между схемами этих составляющих в местах несимметрии [48-51]. Эти методы требуют специального подхода при решении каждой конкретной задачи и поэтому плохо поддаются формализации для применения при написании программ. Кроме того, метод симметричных составляющих эффективно работает только в случае простой несимметрии.

В случае применения метода фазных координат [41-47, 52-55] достаточно просто учитываются несимметричные трехфазные элементы (например участки линий с пофазно-различными параметрами, несимметричные нагрузки), несимметричные соединения элементов сети (например трехфазных групп трансформаторов), а также условия короткого замыкания и разрыва фаз (путем коммутации узлов и ветвей схемы замещения).

Таким образом, применение метода фазных координат целесообразно в первую очередь при необходимости учета пофазных различий в параметрах линий и параметрах нагрузки (например при отказе от транспозиции [56-58]). К таким задачам также относятся расчеты установившихся режимов и режимов короткого замыкания в сетях питающих тяговые подстанции переменного тока [41,42,54], определение наведенных напряжений на соседние линии со стороны высоковольтных ЛЭП, а также расчеты потерь мощности и энергии в электрических сетях в несимметричных режимах.

При выполнении анализа режимов работы сети внешнего электроснабжения, питающей тяговые подстанции электрифицированных дорог на переменном токе, для которых характерно значительное искажение режимных параметров по фазам, необходимо учитывать сложную конфигурацию сети [5-9, 27-32]. Традиционно применяемые методы анализа режимов работы электрических систем, базирующиеся на однолинейном

представлении трехфазных цепей, не применимы в данном случае. Однолинейное представление приводит к недопустимым погрешностям. Кроме того, системы электроснабжения железных дорог, как было отмечено выше, обладают рядом особенностей, которые необходимо учитывать при анализе режимов работы сети [18, 19, 28, 32, 59].

Первая особенность состоит в резкопеременном характере однофазных тяговых нагрузок, перемещающихся в пространстве.

Вторая особенность заключается в существенной несимметрии напряжений на шинах 6–10–35–110–220 кВ тяговых подстанций и на зажимах потребителей, питающихся от этих шин. При подключении систем электроснабжения железных дорог к сетям ЭЭС с малым уровнем мощности короткого замыкания (1000 МВА и менее) уровень несимметрии может превышать нормируемые пределы.

По приведенным причинам проблемы полного моделирования таких сетей, разработки методов эквивалентирования и методики расчета в целом в фазных координатах при анализе таких сетей являются актуальными.

Программ EUROSTAG и возможности ее использования для расчета установившихся несимметричных режимов. Программа предназначена для расчета протекающих в энергосистеме электромеханических переходных процессов любой длительности от долей секунды до часов [60]. При этом точность расчета не зависит от продолжительности моделируемого переходного процесса, поскольку реализованный в EUROSTAG алгоритм интегрирования дифференциальных уравнений автоматически подбирает шаг интегрирования в соответствии с точностью, необходимой пользователю.

Программный комплекс EUROSTAG позволяет, помимо основного предназначения, моделировать работу энергосистемы, при несимметричных возмущениях или в несимметричных режимах, таких как:

- изучение динамики энергосистемы при несимметричных воздействиях;

- расчет токов короткого при неограниченном числе одновременных несимметричных условий;
- моделирование несимметричных режимов работы системы;
- исследования схем релейной защиты.

При моделировании несимметричных режимов, для задания параметров элементов требуется ввести параметры по прямой, обратной и нулевой последовательности (разложение Фортескью):

- модель линии: П-образная модель для трех последовательностей, взаимосвязанных между собой;
- модели нагрузки и устройств компенсации;
- модель трансформатора: модель обратной последовательности идентична модели прямой последовательности, сопротивления обратной и прямой последовательности комплексно сопряженные.
- модель последовательного элемента: последовательные элементы представляются как линии без шунтирующих связей.

Несимметричный участок схемы может быть встроен в симметричную систему. В модель системы может быть введено один или более несимметричных участков, смоделированных в деталях, а также симметричные участки, заданные только параметрами прямой последовательности. Это позволяет сэкономить время вычислений, сохраняя при этом необходимую точность.

Расчет режимов в программе EUROSTAG выполняется численными методами, что может отразиться на точности и времени расчетов.

Применение программы EMTP для анализа установившихся несимметричных режимов. EMTP – универсальная программа для цифрового моделирования переходных явлений как электромагнитного, так и электромеханического характера. С помощью этой программы могут моделироваться сложные сети и системы управления произвольной структуры. EMTP используется для анализа коммутационных и грозовых перенапряжений, исследования координации изоляции и вращательных

колебаний электрических машин, моделирования релейной защиты и гармонического анализа, изучение проблемы качества электроэнергии и электромагнитной совместимости [61].

Система в ЕМТР моделируется пофазно с представлением всех связей и всех необходимых компонент. Что касается систем управления, они, как правило, представляются с использованием блок-схем. Программа позволяет проводить гармонический анализ режимов сети, а также учитывать несимметрию.

Главным и первоначальным применением ЕМТР является вычисление перенапряжений в энергосистемах. Кроме того комплекс ЕМТР может быть применен при решении задач определения качества электроэнергии.

В программном комплексе ЕМТР присутствует возможность для учета несимметричных условий. Также могут быть учтены характеристики нагрузки по частоте и напряжению. ЕМТР позволяет выполнить моделирование сети пофазно, что является гораздо более общим, чем традиционные инструменты для анализа систем.

Программа FAZANORD, разработанная в Иркутском ГУПС. Программный комплекс “Fazanord-Качество” предназначен для моделирования электрических систем и систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока с учетом перемещающихся тяговых нагрузок. В комплексе использовано графическое представление расчетных схем с использованием визуальных компонент из набора элементов. Моделируемая система может включать в свой состав воздушные линии различного конструктивного исполнения, одножильные и трехжильные кабели, трехстержневые и пятистержневые трехфазные трансформаторы с любым соединением обмоток, асинхронную нагрузку. Программный комплекс предназначен для решения следующих задач [2,6,7,17,62]:

- имитационное моделирование движения поездов с расчетами режимов и определением отклонений напряжения, показателей несимметрии и несинусоидальности напряжений и токов;

- расчеты установившихся токов симметричных и несимметричных коротких замыканий.

В данном программном комплексе эффективно решена основная проблема реализации модели электрической системы, питающей электрические тяговые нагрузки, состоящая в существенной нестационарности параметров сети по времени и непрерывном изменении не только численных значений коэффициентов, но и структуры модели, вызванном наличием тяговых нагрузок, перемещающихся в пространстве [1,3,4,7,10,16,62].

Преимущества имитационного подхода при моделировании таких сетей, основанного на применении комплекса программ “Fazonord-Качество” состоят в следующем:

- возможности получения реальной динамики изменения параметров режима, вызванных движением поездов по трассам, с учетом планов и профиля пути;

- полнофазное моделирование многопроводных статических элементов электроэнергетической системы (линий электропередачи и трансформаторов) на основе решетчатых схем замещения [62].

В программном комплексе “Fazonord-Качество” реализован обобщенный метод моделирования в фазных координатах многопроводных систем, основанный на использовании решетчатых схем замещения элементов сети линий и трансформаторов [62]. В основе метода моделирования лежат полностью связанные решетчатые схемы замещения из RLC-элементов. Применение таких схем замещения позволяет использовать хорошо разработанные методики расчета режимов ЭЭС, применяемые в однолинейной постановке.

При использовании данного метода линии электропередачи и трансформаторы представляются в виде многопроводных элементов со взаимными электромагнитными связями между проводами, для которых применим обобщенный подход к моделированию в фазных координатах. При вынесении соединения проводов за рамки рассматриваемой модели элемента, линии и трансформаторы будут отличаться друг от друга только характером взаимоиндуктивной связи проводов. У каждого провода в этих моделях есть начало и конец, а ток, втекающий в начало провода, будет равен току, вытекающему из его конца. При этом сумма двух втекающих в провод токов равна нулю. В случае моделирования воздушной линии часть тока может протекать через землю, однако если принять потенциал земли равным нулю, то эффекты, вносимые токами в земле, можно учесть в сопротивлении проводов. Характер взаимоиндуктивных связей трансформатора определяется конструкцией его сердечника, однако влияние этого фактора распространяется только на специфику расчета сопротивлений взаимоиндуктивных связей. Для воздушных линий помимо взаимоиндуктивных требуется учет емкостных связей проводов. Для большинства случаев, встречающихся на практике, это можно выполнить обычным образом, путем введения собственных и взаимных емкостей проводов в П-образной схеме замещения после составления решетчатой схемы замещения. Подобный подход позволяет достаточно просто выполнить моделирование линий и трансформаторов для расчета синусоидальных установившихся процессов.

Матричный метод моделирования протяженной сети высокого и сверхвысокого напряжения с использованием фазных координат. В перечисленных выше программных комплексах используются итерационные методы, позволяющие рассчитывать конкретные режимы и мало приспособленные для получения общих закономерностей между анализируемыми переменными [32, 63-67]. В данной работе предлагается методика, основанная на матричном представлении элементов

высоковольтной сети в фазных координатах, которая дает возможность реализовать алгоритм расчета несимметрии в аналитической форме, что позволило создать метод определения параметров симметрирующих устройств и обосновать алгоритм управления их параметрами [68].

ГЛАВА 2 МАТРИЧНЫЙ МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОТЯЖЕННОЙ СЕТИ

2.1 Общие положения

Для протяжённых сетей, питающих тяговую нагрузку, характерны значительные уровни несимметрии токов и напряжений, вызванные пофазно различными нагрузками от тяговой нагрузки. Анализ установившихся режимов таких сетей в однолинейной постановке приведен к недопустимой погрешности в силу существенного различия нагрузки по фазам [1,5,7,10-14,32,22].

Современная вычислительная техника и математическое программное обеспечение позволяют достаточно быстро проводить анализ режимов работы электроэнергетических систем непосредственно в фазных координатах. Для этой цели необходимы математические модели соответствующих элементов сети относительно фазных переменных. При этом компактной и наглядной является матричная форма записи уравнений элементов протяжённой сети [63-70]. Каждый элемент сети представляется в виде многополюсника (Рисунок 2.1), число полюсов которого в общем случае различно.

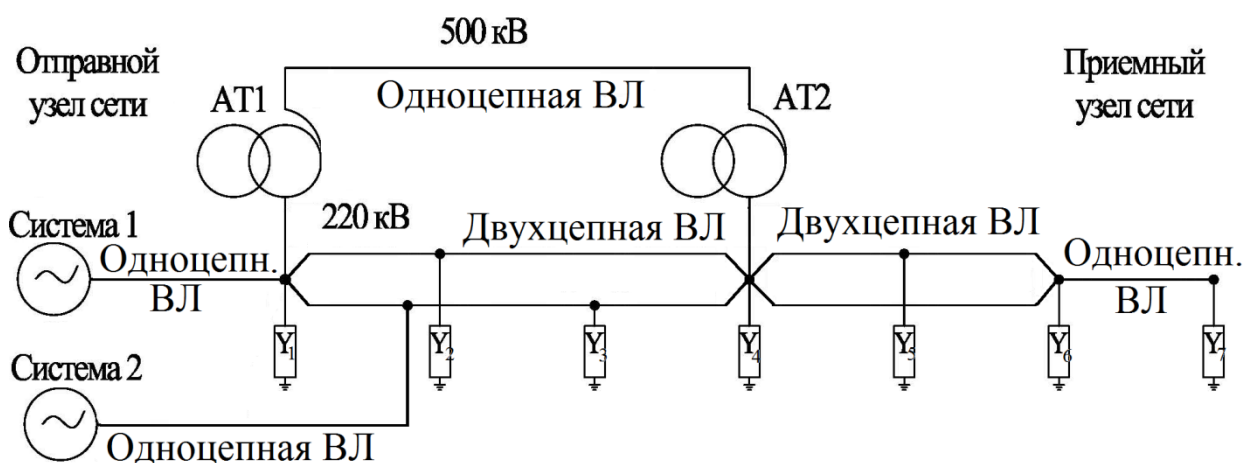


Рисунок 2.1 – Участок протяжённой высоковольтной сети

При матричной форме представления различных многополюсников протяженной сети возможно получение алгоритма в аналитической форме, что облегчает проведение намеченного анализа.

Далее рассмотрим описание первой части предложенной методики, включающей матричные модели в фазных координатах всех элементов протяженной высоковольтной сети и способы эквивалентирования и преобразования отдельных участков сети.

2.2 Матричная модель одноцепной трёхфазной воздушной линии

Процессы в 3-фазной линии (Рисунок 2.2) описываются телеграфными уравнениями, представляющими уравнения в частных производных относительно токов и напряжений.

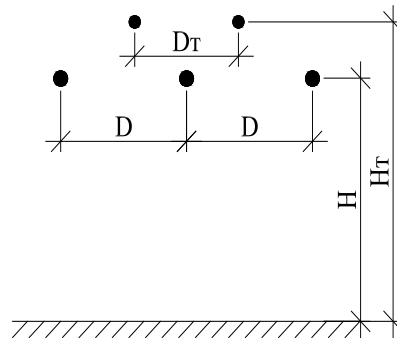


Рисунок 2.2 – Расположение фаз и тросов 3-фазной линии над землёй

Решение этих уравнений непосредственно в фазных координатах довольно громоздко. Поэтому используются модальные координаты, в результате чего происходит переход от системы взаимосвязанных уравнений к уравнениям относительно несвязанных между собой модальных переменных, так называемых мод [63,64,66,69].

Порядок получения решения уравнений трёхфазной линии в фазных координатах включает следующие этапы.

1. Запись телеграфных уравнений в комплексной форме относительно фазных переменных

$$-\frac{d\underline{U}_\phi}{dx} = \underline{Z} \cdot \underline{I}_\phi, \quad (2.1)$$

$$-\frac{d\underline{I}_\phi}{dx} = \underline{Y} \cdot \underline{U}_\phi,$$

где $\underline{U}_\phi = \begin{bmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{bmatrix}$, $\underline{I}_\phi = \begin{bmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{bmatrix}$ – вектор - столбцы комплексных величин

напряжений и токов в точке x линии соответственно;

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} r + r_3 & r_3 & r_3 \\ r_3 & r + r_3 & r_3 \\ r_3 & r_3 & r + r_3 \end{bmatrix} + j\omega \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{aa} & \underline{Z}_{ab} & \underline{Z}_{ac} \\ \underline{Z}_{ba} & \underline{Z}_{bb} & \underline{Z}_{bc} \\ \underline{Z}_{ca} & \underline{Z}_{cb} & \underline{Z}_{cc} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{квадратная}$$

матрица продольных удельных сопротивлений;

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{aa} & -\underline{Y}_{ab} & -\underline{Y}_{ac} \\ -\underline{Y}_{ba} & \underline{Y}_{bb} & -\underline{Y}_{bc} \\ -\underline{Y}_{ca} & -\underline{Y}_{cb} & \underline{Y}_{cc} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{квадратная матрица удельных поперечных}$$

проводимостей.

2. Преобразование телеграфных уравнений к уравнениям относительно модальных составляющих

$$\begin{aligned} \underline{U}_M &= \underline{S}^{-1} \underline{U}, \\ \underline{I}_M &= \underline{S}_t \underline{I}, \end{aligned} \quad (2.2)$$

где $\underline{U}_M = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \end{bmatrix}$, $\underline{I}_M = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \end{bmatrix}$ – вектор-столбцы модальных режимных

параметров,

$\underline{S} = \text{eig}(\underline{Z} \underline{Y})$ - преобразующая матрица, которая находится в результате нахождения собственных векторов матрицы $\underline{Z} \underline{Y}$.

3. представление уравнений длинной линии в матричной форме для модальных составляющих

$$\begin{aligned}\underline{U}_{\text{нм}} &= \underline{A}_M \underline{U}_{\text{км}} + \underline{B}_M \underline{I}_{\text{км}}, \\ \underline{I}_{\text{нм}} &= \underline{C}_M \underline{U}_{\text{км}} + \underline{D}_M \underline{I}_{\text{км}}\end{aligned}\quad (2.3)$$

где

$$\underline{A}_M = \begin{vmatrix} \underline{A}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{A}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{A}_3 \end{vmatrix}, \quad \underline{B}_M = \begin{vmatrix} \underline{B}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{B}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{B}_3 \end{vmatrix},$$

$$\underline{C}_M = \begin{vmatrix} \underline{C}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{C}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{C}_3 \end{vmatrix}, \quad \underline{D}_M = \begin{vmatrix} \underline{D}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{D}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{D}_3 \end{vmatrix} - \text{диагональные матрицы}$$

коэффициентов модальных двухполюсников,

$$\underline{A}_v = \text{ch } \underline{\gamma}_v \ell; \quad \underline{B}_v = \underline{Z}_{\text{wv}} \text{sh } \underline{\gamma}_v \ell; \quad \underline{C}_v = \frac{\text{sh } \underline{\gamma}_v \ell}{\underline{Z}_{\text{wv}}}; \quad \underline{D}_v = \text{ch } \underline{\gamma}_v \ell,$$

$\underline{\gamma}_v$, $\underline{Z}_{\text{wv}}$ - постоянная распространения и волновое сопротивление для v -ой моды.

4. Переход к уравнениям длинной линии в фазных координатах

$$\begin{aligned}\underline{U}_{\text{н.ф}} &= \underline{A}_\Phi \underline{U}_{\text{к.ф}} + \underline{B}_\Phi \underline{I}_{\text{к.ф}}, \\ \underline{I}_{\text{н.ф}} &= \underline{C}_\Phi \underline{U}_{\text{к.ф}} + \underline{D}_\Phi \underline{I}_{\text{к.ф}},\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$\underline{A}_\Phi = \underline{S} \underline{A}_M \underline{S}^{-1} = \begin{vmatrix} \underline{A}_{\text{aa}} & \underline{A}_{\text{ab}} & \underline{A}_{\text{ac}} \\ \underline{A}_{\text{ba}} & \underline{A}_{\text{bb}} & \underline{A}_{\text{bc}} \\ \underline{A}_{\text{ca}} & \underline{A}_{\text{cb}} & \underline{A}_{\text{cc}} \end{vmatrix}; \quad \underline{B}_\Phi = \underline{S} \underline{B}_M \underline{S}_t = \begin{vmatrix} \underline{B}_{\text{aa}} & \underline{B}_{\text{ab}} & \underline{B}_{\text{ac}} \\ \underline{B}_{\text{ba}} & \underline{B}_{\text{bb}} & \underline{B}_{\text{bc}} \\ \underline{B}_{\text{ca}} & \underline{B}_{\text{cb}} & \underline{B}_{\text{cc}} \end{vmatrix};$$

где

$$\underline{C}_\Phi = \underline{S}_t^{-1} \underline{C}_M \underline{S}^{-1} = \begin{vmatrix} \underline{C}_{\text{aa}} & \underline{C}_{\text{ab}} & \underline{C}_{\text{ac}} \\ \underline{C}_{\text{ba}} & \underline{C}_{\text{bb}} & \underline{C}_{\text{bc}} \\ \underline{C}_{\text{ca}} & \underline{C}_{\text{cb}} & \underline{C}_{\text{cc}} \end{vmatrix}; \quad \underline{D}_\Phi = \underline{S}_t^{-1} \underline{D}_M \underline{S}_t = \begin{vmatrix} \underline{D}_{\text{aa}} & \underline{D}_{\text{ab}} & \underline{D}_{\text{ac}} \\ \underline{D}_{\text{ba}} & \underline{D}_{\text{bb}} & \underline{D}_{\text{bc}} \\ \underline{D}_{\text{ca}} & \underline{D}_{\text{cb}} & \underline{D}_{\text{cc}} \end{vmatrix}^{-1}$$

матричные фазные коэффициенты.

В частном случае идеально транспонированной линии переход от симметричных составляющих (прямая, обратная и нулевая

последовательности) осуществляется с помощью хорошо известной матрицы преобразования

$$\underline{S} = \underline{S}_{сим} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{vmatrix} \quad (2.5)$$

2.3 Матричная модель двухцепной трёхфазной воздушной линии

2.3.1 Нетранспонированная линия

На рисунке 2.3 показано схематическое расположение фаз двухцепной линии на опоре.

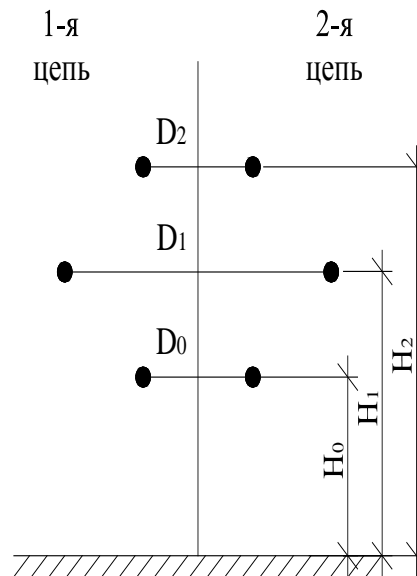


Рисунок 2.3– Схематическое расположение фаз двухцепной линии

Установившиеся процессы в двухцепной линии описываются следующей системой дифференциальных уравнений

$$-\frac{d\underline{U}_x}{dx} = \underline{Z}_6 \underline{I}_x, \quad -\frac{d\underline{I}_x}{dx} = \underline{Y}_6 \underline{U}_x, \quad (2.6)$$

где $\underline{U}_x = \begin{bmatrix} \underline{U}_{x.a1} \\ \underline{U}_{x.b1} \\ \underline{U}_{x.c1} \\ \underline{U}_{x.a2} \\ \underline{U}_{x.b2} \\ \underline{U}_{x.c2} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_x = \begin{bmatrix} \underline{I}_{x.a1} \\ \underline{I}_{x.b1} \\ \underline{I}_{x.c1} \\ \underline{I}_{x.a2} \\ \underline{I}_{x.b2} \\ \underline{I}_{x.c2} \end{bmatrix}$ - вектор-столбцы фазных напряжений и

токов в произвольной точке линии;

$$\underline{Z}_6 = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{aa1} & \underline{Z}_{ab1} & \underline{Z}_{ac1} & \underline{Z}_{a1a2} & \underline{Z}_{a1b2} & \underline{Z}_{a1c2} \\ \underline{Z}_{ba1} & \underline{Z}_{bb1} & \underline{Z}_{bc1} & \underline{Z}_{b1a2} & \underline{Z}_{b1b2} & \underline{Z}_{b1c2} \\ \underline{Z}_{ca1} & \underline{Z}_{cb1} & \underline{Z}_{cc1} & \underline{Z}_{c1a2} & \underline{Z}_{c1b2} & \underline{Z}_{c1c2} \\ \underline{Z}_{a2a1} & \underline{Z}_{a2b1} & \underline{Z}_{a2c1} & \underline{Z}_{aa2} & \underline{Z}_{ab2} & \underline{Z}_{ac2} \\ \underline{Z}_{b2a1} & \underline{Z}_{b2b1} & \underline{Z}_{b2c1} & \underline{Z}_{ba2} & \underline{Z}_{bb2} & \underline{Z}_{bc2} \\ \underline{Z}_{c2a1} & \underline{Z}_{c2b1} & \underline{Z}_{c2c1} & \underline{Z}_{ca2} & \underline{Z}_{cb2} & \underline{Z}_{cc2} \end{bmatrix},$$

$$\underline{Y}_6 = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{aa1} & -\underline{Y}_{ab1} & -\underline{Y}_{ac1} & -\underline{Y}_{a1a2} & -\underline{Y}_{a1b2} & -\underline{Y}_{a1c2} \\ -\underline{Y}_{ba1} & \underline{Y}_{bb1} & -\underline{Y}_{bc1} & -\underline{Y}_{b1a2} & -\underline{Y}_{b1b2} & -\underline{Y}_{b1c2} \\ -\underline{Y}_{ca1} & -\underline{Y}_{cb1} & \underline{Y}_{cc1} & -\underline{Y}_{c1a2} & -\underline{Y}_{c1b2} & -\underline{Y}_{c1c2} \\ -\underline{Y}_{a2a1} & -\underline{Y}_{a2b1} & -\underline{Y}_{a2c1} & \underline{Y}_{aa2} & -\underline{Y}_{ab2} & -\underline{Y}_{ac2} \\ -\underline{Y}_{b2a1} & -\underline{Y}_{b2b1} & -\underline{Y}_{b2c1} & -\underline{Y}_{ba2} & \underline{Y}_{bb2} & -\underline{Y}_{bc2} \\ -\underline{Y}_{c2a1} & -\underline{Y}_{c2b1} & -\underline{Y}_{c2c1} & -\underline{Y}_{ca2} & -\underline{Y}_{cb2} & \underline{Y}_{cc2} \end{bmatrix} \quad - \text{ матрицы}$$

удельных продольных и поперечных параметров двухцепной линии.

Приведённая система дифференциальных уравнений может быть решена при помощи перехода к модальным координатам, аналогично тому как это было выполнено для 3-фазной ВЛ. Разница будет заключаться только в том, что в случае двухцепной линии необходимо выполнять действия с векторами и матрицами 6-го порядка, при этом процесс получения решения будет содержать те же этапы и в той же последовательности, что и для одноцепной линии [63,64,66,69].

Решив дифференциальные уравнения двухцепной линии, её можно представить в виде 12-полюсника (Рисунок 2.4).

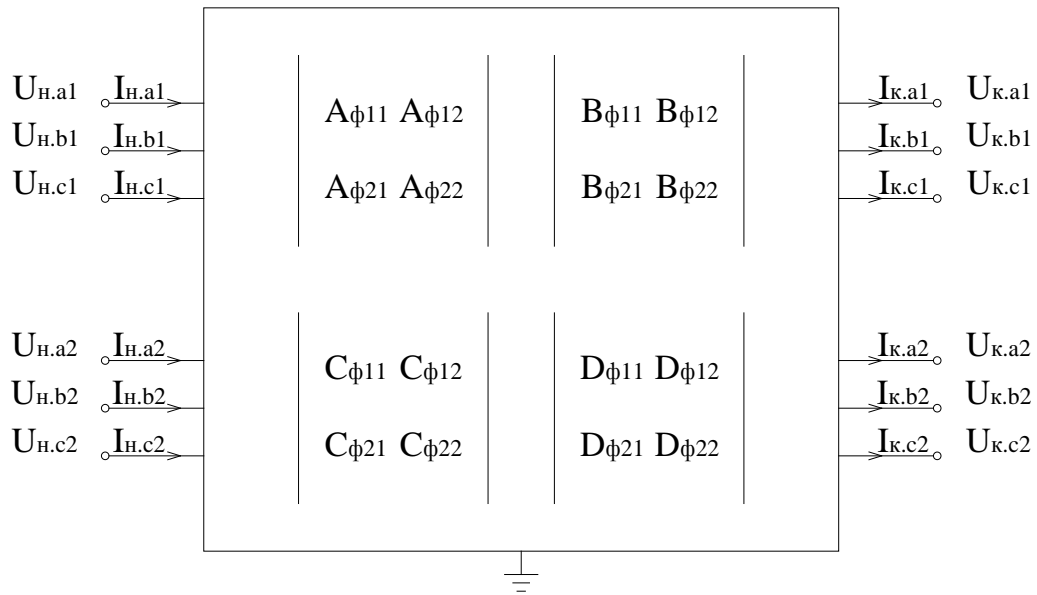


Рисунок 2.4 – Представление 12-полюсником двухцепной 3-фазной схемы

Связь между режимными параметрами по концам линии в фазных координатах определяется уравнениями длинной линии

$$\begin{aligned} \underline{U}_{н.6\phi} &= \underline{A}_{6\phi} \underline{U}_{к.6\phi} + \underline{B}_{6\phi} \underline{I}_{к.6\phi}, \\ \underline{I}_{н.6\phi} &= \underline{C}_{6\phi} \underline{U}_{к.6\phi} + \underline{D}_{6\phi} \underline{I}_{к.6\phi}, \end{aligned} \quad (2.7)$$

где $\underline{U}_{н.6\phi} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{H.a1} \\ \underline{U}_{H.b1} \\ \underline{U}_{H.c1} \\ \underline{U}_{H.a2} \\ \underline{U}_{H.b2} \\ \underline{U}_{H.c2} \end{bmatrix}$, $\underline{U}_{к.6\phi} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{K.a1} \\ \underline{U}_{K.b1} \\ \underline{U}_{K.c1} \\ \underline{U}_{K.a2} \\ \underline{U}_{K.b2} \\ \underline{U}_{K.c2} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_{н.6\phi} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{H.a1} \\ \underline{I}_{H.b1} \\ \underline{I}_{H.c1} \\ \underline{I}_{H.a2} \\ \underline{I}_{H.b2} \\ \underline{I}_{H.c2} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_{к.6\phi} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{K.a1} \\ \underline{I}_{K.b1} \\ \underline{I}_{K.c1} \\ \underline{I}_{K.a2} \\ \underline{I}_{K.b2} \\ \underline{I}_{K.c2} \end{bmatrix}$ - вектор-столбцы

фазных напряжений и токов соответственно в начале и конце линии;

$$\underline{A}_6 = \begin{bmatrix} \underline{A}_{aa1} & \underline{A}_{ab1} & \underline{A}_{ac1} & \underline{A}_{a1a2} & \underline{A}_{a1b2} & \underline{A}_{a1c2} \\ \underline{A}_{ba1} & \underline{A}_{bb1} & \underline{A}_{bc1} & \underline{A}_{b1a2} & \underline{A}_{b1b2} & \underline{A}_{b1c2} \\ \underline{A}_{ca1} & \underline{A}_{cb1} & \underline{A}_{cc1} & \underline{A}_{c1a2} & \underline{A}_{c1b2} & \underline{A}_{c1c2} \\ \underline{A}_{a2a1} & \underline{A}_{a2b1} & \underline{A}_{a2c1} & \underline{A}_{aa2} & \underline{A}_{ab2} & \underline{A}_{ac2} \\ \underline{A}_{b2a1} & \underline{A}_{b2b1} & \underline{A}_{b2c1} & \underline{A}_{ba2} & \underline{A}_{bb2} & \underline{A}_{bc2} \\ \underline{A}_{c2a1} & \underline{A}_{c2b1} & \underline{A}_{c2c1} & \underline{A}_{ca2} & \underline{A}_{cb2} & \underline{A}_{cc2} \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_6 = \begin{bmatrix} \underline{B}_{aa1} & \underline{B}_{ab1} & \underline{B}_{ac1} & \underline{B}_{a1a2} & \underline{B}_{a1b2} & \underline{B}_{a1c2} \\ \underline{B}_{ba1} & \underline{B}_{bb1} & \underline{B}_{bc1} & \underline{B}_{b1a2} & \underline{B}_{b1b2} & \underline{B}_{b1c2} \\ \underline{B}_{ca1} & \underline{B}_{cb1} & \underline{B}_{cc1} & \underline{B}_{c1a2} & \underline{B}_{c1b2} & \underline{B}_{c1c2} \\ \underline{B}_{a2a1} & \underline{B}_{a2b1} & \underline{B}_{a2c1} & \underline{B}_{aa2} & \underline{B}_{ab2} & \underline{B}_{ac2} \\ \underline{B}_{b2a1} & \underline{B}_{b2b1} & \underline{B}_{b2c1} & \underline{B}_{ba2} & \underline{B}_{bb2} & \underline{B}_{bc2} \\ \underline{B}_{c2a1} & \underline{B}_{c2b1} & \underline{B}_{c2c1} & \underline{B}_{ca2} & \underline{B}_{cb2} & \underline{B}_{cc2} \end{bmatrix}$$

$$\underline{C}_6 = \begin{bmatrix} \underline{C}_{aa1} & \underline{C}_{ab1} & \underline{C}_{ac1} & \underline{C}_{a1a2} & \underline{C}_{a1b2} & \underline{C}_{a1c2} \\ \underline{C}_{ba1} & \underline{C}_{bb1} & \underline{C}_{bc1} & \underline{C}_{b1a2} & \underline{C}_{b1b2} & \underline{C}_{b1c2} \\ \underline{C}_{ca1} & \underline{C}_{cb1} & \underline{C}_{cc1} & \underline{C}_{c1a2} & \underline{C}_{c1b2} & \underline{C}_{c1c2} \\ \underline{C}_{a2a1} & \underline{C}_{a2b1} & \underline{C}_{a2c1} & \underline{C}_{aa2} & \underline{C}_{ab2} & \underline{C}_{ac2} \\ \underline{C}_{b2a1} & \underline{C}_{b2b1} & \underline{C}_{b2c1} & \underline{C}_{ba2} & \underline{C}_{bb2} & \underline{C}_{bc2} \\ \underline{C}_{c2a1} & \underline{C}_{c2b1} & \underline{C}_{c2c1} & \underline{C}_{ca2} & \underline{C}_{cb2} & \underline{C}_{cc2} \end{bmatrix},$$

$$\underline{D}_6 = \begin{bmatrix} \underline{D}_{aa1} & \underline{D}_{ab1} & \underline{D}_{ac1} & \underline{D}_{a1a2} & \underline{D}_{a1b2} & \underline{D}_{a1c2} \\ \underline{D}_{ba1} & \underline{D}_{bb1} & \underline{D}_{bc1} & \underline{D}_{b1a2} & \underline{D}_{b1b2} & \underline{D}_{b1c2} \\ \underline{D}_{ca1} & \underline{D}_{cb1} & \underline{D}_{cc1} & \underline{D}_{c1a2} & \underline{D}_{c1b2} & \underline{D}_{c1c2} \\ \underline{D}_{a2a1} & \underline{D}_{a2b1} & \underline{D}_{a2c1} & \underline{D}_{aa2} & \underline{D}_{ab2} & \underline{D}_{ac2} \\ \underline{D}_{b2a1} & \underline{D}_{b2b1} & \underline{D}_{b2c1} & \underline{D}_{ba2} & \underline{D}_{bb2} & \underline{D}_{bc2} \\ \underline{D}_{c2a1} & \underline{D}_{c2b1} & \underline{D}_{c2c1} & \underline{D}_{ca2} & \underline{D}_{cb2} & \underline{D}_{cc2} \end{bmatrix} - \text{матричные коэффициенты}$$

линии, представленной в виде 12-полюсника.

2.3.2 Идеально-транспонированная линия

На большинстве участков БАМ линии 220 кВ выполнены транспонированными [59]. При рассмотрении процессов в сети с достаточной степенью точности можно принять указанные линии идеально транспонированными (данное допущение, как показывают расчёты, дает погрешность при определении коэффициентов несимметрии порядка 1%, что существенно меньше несимметрии, создаваемой пофазно различной тяговой нагрузкой).

Установившийся режим в двухцепной идеально транспонированной линии описывается следующей системой дифференциальных уравнений [49,70]

$$-\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \underline{U}_{\phi 1} \\ \underline{U}_{\phi 2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{Z} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_{\phi 1} \\ \underline{I}_{\phi 2} \end{vmatrix}, \quad -\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \underline{I}_{\phi 1} \\ \underline{I}_{\phi 2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{Y} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{12} & \underline{Y} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}_{\phi 1} \\ \underline{U}_{\phi 2} \end{vmatrix}, \quad (2.8)$$

где $\underline{U}_{\phi 1} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{a1} \\ \underline{U}_{b1} \\ \underline{U}_{c1} \end{vmatrix}$, $\underline{U}_{\phi 2} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{a2} \\ \underline{U}_{b2} \\ \underline{U}_{c2} \end{vmatrix}$, $\underline{I}_{\phi 1} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{a1} \\ \underline{I}_{b1} \\ \underline{I}_{c1} \end{vmatrix}$, $\underline{I}_{\phi 2} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{a2} \\ \underline{I}_{b2} \\ \underline{I}_{c2} \end{vmatrix}$ – вектор-столбцы

соответственно напряжений и токов 1-ой и 2-ой цепей в точке x линии;

$$\underline{Z} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{\phi} & -\underline{Z}_{\phi\phi} & -\underline{Z}_{\phi\phi} \\ -\underline{Z}_{\phi\phi} & \underline{Z}_{\phi} & -\underline{Z}_{\phi\phi} \\ -\underline{Z}_{\phi\phi} & -\underline{Z}_{\phi\phi} & \underline{Z}_{\phi} \end{vmatrix}, \quad \underline{Y} = \begin{vmatrix} \underline{Y}_{\phi} & -\underline{Y}_{\phi\phi} & -\underline{Y}_{\phi\phi} \\ -\underline{Y}_{\phi\phi} & \underline{Y}_{\phi} & -\underline{Y}_{\phi\phi} \\ -\underline{Y}_{\phi\phi} & -\underline{Y}_{\phi\phi} & \underline{Y}_{\phi} \end{vmatrix} - \text{матрицы}$$

удельных продольных и поперечных параметров отдельных цепей;

$$\underline{Z}_{12} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{12} \end{vmatrix}, \quad \underline{Y}_{12} = \begin{vmatrix} \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{12} & \underline{Y}_{12} \end{vmatrix} - \text{матрицы}$$

удельных продольных и поперечных параметров, отражающие взаимное влияние цепей.

Перепишем систему уравнений (2.8) в виде двух трёхфазных подсистем

$$\begin{aligned} -\frac{d\underline{U}_{\phi 1}}{dx} &= \underline{Z}\underline{I}_{\phi 1} + \underline{Z}_{12}\underline{I}_{\phi 2}, & -\frac{d\underline{U}_{\phi 2}}{dx} &= \underline{Z}_{12}\underline{I}_{\phi 1} + \underline{Z}\underline{I}_{\phi 2}, \\ -\frac{d\underline{I}_{\phi 1}}{dx} &= \underline{Y}\underline{U}_{\phi 1} + \underline{Y}_{12}\underline{U}_{\phi 2}, & -\frac{d\underline{I}_{\phi 2}}{dx} &= \underline{Y}_{12}\underline{U}_{\phi 1} + \underline{Y}\underline{U}_{\phi 2}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Перейдём от этой системы уравнений к системе относительно симметричных составляющих, воспользовавшись матрицей преобразования (2.5). В результате имеем

$$\begin{aligned} -\frac{d\underline{U}_{\text{сим}1}}{dx} &= \underline{Z}_{\text{сим}}\underline{I}_{\text{сим}1} + \underline{Z}_{\text{сим}12}\underline{I}_{\text{сим}2}, & -\frac{d\underline{U}_{\text{сим}2}}{dx} &= \underline{Z}_{\text{сим}12}\underline{I}_{\text{сим}1} + \underline{Z}_{\text{сим}}\underline{I}_{\text{сим}2}, \\ -\frac{d\underline{I}_{\text{сим}1}}{dx} &= \underline{Y}_{\text{сим}}\underline{U}_{\text{сим}1} + \underline{Y}_{\text{сим}12}\underline{U}_{\text{сим}2}, & -\frac{d\underline{I}_{\text{сим}2}}{dx} &= \underline{Y}_{\text{сим}12}\underline{U}_{\text{сим}1} + \underline{Y}_{\text{сим}}\underline{U}_{\text{сим}2}, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где $\underline{U}_{\text{сим1}} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{пр1}} \\ \underline{U}_{\text{об1}} \\ \underline{U}_{\text{о1}} \end{vmatrix}$, $\underline{U}_{\text{сим2}} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{пр2}} \\ \underline{U}_{\text{об2}} \\ \underline{U}_{\text{о2}} \end{vmatrix}$, $\underline{I}_{\text{сим1}} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{\text{пр1}} \\ \underline{I}_{\text{об1}} \\ \underline{I}_{\text{о1}} \end{vmatrix}$, $\underline{I}_{\text{сим2}} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{\text{пр2}} \\ \underline{I}_{\text{об2}} \\ \underline{I}_{\text{о2}} \end{vmatrix}$ – вектор-столбцы

соответственно симметричных составляющих напряжений и токов 1-ой и 2-ой цепей в точке x линии;

$$\underline{Z}_{\text{сим}} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{\text{пр}} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{\text{об}} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{о}} \end{vmatrix}, \quad \underline{Z}_{\text{сим12}} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{о12}} \end{vmatrix},$$

$$\underline{Y}_{\text{сим}} = \begin{vmatrix} \underline{Y}_{\text{пр}} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{\text{об}} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{\text{о}} \end{vmatrix}, \quad \underline{Y}_{\text{сим12}} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{\text{о12}} \end{vmatrix},$$

$$\underline{Z}_{\text{пр}} = \underline{Z}_{\text{об}} = \underline{Z}_{\text{ф}} - \underline{Z}_{\text{фф}}, \quad \underline{Z}_{\text{о}} = \underline{Z}_{\text{ф}} + 2\underline{Z}_{\text{фф}}, \quad \underline{Z}_{\text{о12}} = 3\underline{Z}_{\text{12}},$$

$$\underline{Y}_{\text{пр}} = \underline{Y}_{\text{об}} = \underline{Y}_{\text{ф}} - \underline{Y}_{\text{фф}}, \quad \underline{Y}_{\text{о}} = \underline{Y}_{\text{ф}} + 2\underline{Y}_{\text{фф}}, \quad \underline{Y}_{\text{о12}} = 3\underline{Y}_{\text{12}}.$$

Как следует из приведенных уравнений для симметричных составляющих, каналы прямой и обратной последовательности для обеих цепей являются идентичными и независимыми и соответственно режим в них описывается уравнениями однопроводной длинной линии

$$\begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{н.пр}} \\ \underline{U}_{\text{н.об}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{A}_{\text{пр}} & 0 \\ 0 & \underline{A}_{\text{об}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{к.пр}} \\ \underline{U}_{\text{к.пр}} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \underline{B}_{\text{пр}} & 0 \\ 0 & \underline{B}_{\text{об}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_{\text{к.пр}} \\ \underline{I}_{\text{к.пр}} \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} \underline{I}_{\text{н.пр}} \\ \underline{I}_{\text{н.об}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{C}_{\text{пр}} & 0 \\ 0 & \underline{C}_{\text{об}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{к.пр}} \\ \underline{U}_{\text{к.пр}} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \underline{D}_{\text{пр}} & 0 \\ 0 & \underline{D}_{\text{об}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_{\text{к.пр}} \\ \underline{I}_{\text{к.пр}} \end{vmatrix}, \quad (2.11)$$

$$\text{где } \underline{A}_{\text{пр}} = \underline{A}_{\text{об}} = \underline{A} = \text{ch}\underline{\gamma}\ell, \quad \underline{B}_{\text{пр}} = \underline{B}_{\text{об}} = \underline{B} = \underline{Z}_{\text{w}} \text{sh}\underline{\gamma}\ell, \quad \underline{C}_{\text{пр}} = \underline{C}_{\text{об}} = \underline{C} = \frac{\text{sh}\underline{\gamma}\ell}{\underline{Z}_{\text{w}}},$$

$$\underline{D}_{\text{пр}} = \underline{D}_{\text{об}} = \underline{D} = \underline{A}; \quad \underline{\gamma} = \sqrt{(\underline{Z}_{\text{ф}} - \underline{Z}_{\text{фф}}) \cdot (\underline{Y}_{\text{ф}} - \underline{Y}_{\text{фф}})}, \quad \underline{Z}_{\text{w}} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{\text{ф}} - \underline{Z}_{\text{фф}}}{\underline{Y}_{\text{ф}} - \underline{Y}_{\text{фф}}}}.$$

Что касается каналов нулевой последовательности для 1-ой и 2-ой цепей, то они являются взаимосвязанными.

$$-\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{о1}} \\ \underline{U}_{\text{о2}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{\text{о}} & \underline{Z}_{\text{о12}} \\ \underline{Z}_{\text{о12}} & \underline{Z}_{\text{о}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_{\text{о1}} \\ \underline{I}_{\text{о2}} \end{vmatrix}, \quad -\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \underline{I}_{\text{о1}} \\ \underline{I}_{\text{о2}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{Y}_{\text{о}} & \underline{Y}_{\text{о12}} \\ \underline{Y}_{\text{о12}} & \underline{Y}_{\text{о}} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{о1}} \\ \underline{U}_{\text{о2}} \end{vmatrix}. \quad (2.12)$$

Введём новые переменные по каналам нулевой последовательности, которые бы являлись независимыми

$$\begin{vmatrix} \underline{U}'_{o1} \\ \underline{U}'_{o2} \end{vmatrix} = \underline{S}_2^{-1} \begin{vmatrix} \underline{U}_{o1} \\ \underline{U}_{o2} \end{vmatrix}, \quad \begin{vmatrix} \underline{I}'_{o1} \\ \underline{I}'_{o2} \end{vmatrix} = \underline{S}_2^{-1} \begin{vmatrix} \underline{I}_{o1} \\ \underline{I}_{o2} \end{vmatrix}, \quad (2.13)$$

где $\underline{S}_2^{-1} = \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}$ – преобразующая матрица и соответствующая ей обратная

матрица $\underline{S}_2 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{vmatrix}$.

Уравнения относительно новых независимых переменных запишутся

$$-\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \underline{U}'_{o1} \\ \underline{U}'_{o2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{o1} & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{o2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}'_{o1} \\ \underline{I}'_{o2} \end{vmatrix}, \quad -\frac{d}{dx} \begin{vmatrix} \underline{I}'_{o1} \\ \underline{I}'_{o2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{Y}_{o1} & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{o2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}'_{o1} \\ \underline{U}'_{o2} \end{vmatrix},$$

где $\underline{Z}_{o1} = \underline{Z}_o + \underline{Z}_{o12} = \underline{Z}_\phi + 2\underline{Z}_{\phi\phi} + 3\underline{Z}_{12}$, $\underline{Z}_{o2} = \underline{Z}_o - \underline{Z}_{o12} = \underline{Z}_\phi + 2\underline{Z}_{\phi\phi} - 3\underline{Z}_{12}$,

$$\underline{Y}_{o1} = \underline{Y}_o + \underline{Y}_{o12} = \underline{Y}_\phi + 2\underline{Y}_{\phi\phi} + 3\underline{Y}_{12}, \quad \underline{Y}_{o2} = \underline{Y}_o - \underline{Y}_{o12} = \underline{Y}_\phi + 2\underline{Y}_{\phi\phi} - 3\underline{Y}_{12}.$$

Для каждой независимой переменной имеет место решение, аналогичное для однопроводной линии

$$\begin{vmatrix} \underline{U}'_{h.o1} \\ \underline{U}'_{h.o2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{A}_{o1} & 0 \\ 0 & \underline{A}_{o2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}'_{k.o1} \\ \underline{U}'_{k.o2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \underline{B}_{o1} & 0 \\ 0 & \underline{B}_{o2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}'_{k.o1} \\ \underline{I}'_{k.o2} \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} \underline{I}'_{h.o1} \\ \underline{I}'_{h.o2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \underline{C}_{o1} & 0 \\ 0 & \underline{C}_{o2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}'_{k.o1} \\ \underline{U}'_{k.o2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \underline{D}_{o1} & 0 \\ 0 & \underline{D}_{o2} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}'_{k.o1} \\ \underline{I}'_{k.o2} \end{vmatrix}, \quad (2.14)$$

где $\underline{A}_{o1} = \text{ch}\gamma_{o1}\ell$, $\underline{B}_{o1} = \underline{Z}_{wo1}\text{sh}\gamma_{o1}\ell$, $\underline{C}_{o1} = \frac{\text{sh}\gamma_{o1}\ell}{\underline{Z}_{wo1}}$, $\underline{D}_{o1} = \underline{A}_{o1}$;

$$\gamma_{o1} = \sqrt{\underline{Z}_{o1}\underline{Y}_{o1}}, \quad \underline{Z}_{wo1} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{o1}}{\underline{Y}_{o1}}};$$

$$\underline{A}_{o2} = \text{ch}\gamma_{o2}\ell, \quad \underline{B}_{o2} = \underline{Z}_{wo2}\text{sh}\gamma_{o2}\ell, \quad \underline{C}_{o2} = \frac{\text{sh}\gamma_{o2}\ell}{\underline{Z}_{wo2}}, \quad \underline{D}_{o2} = \underline{A}_{o2};$$

$$\gamma_{o2} = \sqrt{\underline{Z}_{o2}\underline{Y}_{o2}}, \quad \underline{Z}_{wo2} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{o2}}{\underline{Y}_{o2}}}.$$

После перехода к исходным взаимозависимым переменным по нулевой последовательности имеем

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \underline{U}_{н.о1} \\ \underline{U}_{н.о2} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \underline{A}_o & \underline{A}_{o12} \\ \underline{A}_{o12} & \underline{A}_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}_{к.о1} \\ \underline{U}_{к.о2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \underline{B}_o & \underline{B}_{o12} \\ \underline{B}_{o12} & \underline{B}_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_{к.о1} \\ \underline{I}_{к.о2} \end{vmatrix}, \\ \begin{vmatrix} \underline{I}_{н.о1} \\ \underline{I}_{н.о2} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} \underline{C}_o & \underline{C}_{o12} \\ \underline{C}_{o12} & \underline{C}_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}_{к.о1} \\ \underline{U}_{к.о2} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \underline{D}_o & \underline{D}_{o12} \\ \underline{D}_{o12} & \underline{D}_o \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{I}_{к.о1} \\ \underline{I}_{к.о2} \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\text{где } \underline{A}_o = \frac{\underline{A}_{o1} + \underline{A}_{o2}}{2}, \underline{A}_{o12} = \frac{\underline{A}_{o1} - \underline{A}_{o2}}{2}; \underline{B}_o = \frac{\underline{B}_{o1} + \underline{B}_{o2}}{2}, \underline{B}_{o12} = \frac{\underline{B}_{o1} - \underline{B}_{o2}}{2};$$

$$\underline{C}_o = \frac{\underline{C}_{o1} + \underline{C}_{o2}}{2}, \underline{C}_{o12} = \frac{\underline{C}_{o1} - \underline{C}_{o2}}{2}; \underline{D}_o = \frac{\underline{D}_{o1} + \underline{D}_{o2}}{2}, \underline{D}_{o12} = \frac{\underline{D}_{o1} - \underline{D}_{o2}}{2}.$$

Учитывая (2.15), решение для двухцепной линии относительно симметричных составляющих запишутся в следующем виде

$$\begin{aligned} \underline{U}_{н.сим1} &= \underline{A}_{сим} \underline{U}_{к.сим1} + \underline{A}_{сим12} \underline{U}_{к.сим2} + \underline{B}_{сим} \underline{I}_{к.сим1} + \underline{B}_{сим12} \underline{I}_{к.сим2}, \\ \underline{U}_{н.сим2} &= \underline{A}_{сим12} \underline{U}_{к.сим1} + \underline{A}_{сим} \underline{U}_{к.сим2} + \underline{B}_{сим12} \underline{I}_{к.сим1} + \underline{B}_{сим} \underline{I}_{к.сим2}, \\ \underline{I}_{н.сим1} &= \underline{C}_{сим} \underline{U}_{к.сим1} + \underline{C}_{сим12} \underline{U}_{к.сим2} + \underline{D}_{сим} \underline{I}_{к.сим1} + \underline{D}_{сим12} \underline{I}_{к.сим2}, \\ \underline{I}_{н.сим2} &= \underline{C}_{сим12} \underline{U}_{к.сим1} + \underline{C}_{сим} \underline{U}_{к.сим2} + \underline{D}_{сим12} \underline{I}_{к.сим1} + \underline{D}_{сим} \underline{I}_{к.сим2}, \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\text{где } \underline{U}_{н.сим1} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{н.пр1} \\ \underline{U}_{н.об1} \\ \underline{U}_{н.о1} \end{vmatrix}, \underline{U}_{н.сим2} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{н.пр2} \\ \underline{U}_{н.об2} \\ \underline{U}_{н.о2} \end{vmatrix}, \underline{U}_{к.сим1} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{к.пр1} \\ \underline{U}_{к.об1} \\ \underline{U}_{к.о1} \end{vmatrix}, \underline{U}_{к.сим2} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{к.пр2} \\ \underline{U}_{к.об2} \\ \underline{U}_{к.о2} \end{vmatrix},$$

$$\underline{I}_{н.сим1} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{н.пр1} \\ \underline{I}_{н.об1} \\ \underline{I}_{н.о1} \end{vmatrix}, \underline{I}_{н.сим2} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{н.пр2} \\ \underline{I}_{н.об2} \\ \underline{I}_{н.о2} \end{vmatrix}, \underline{I}_{к.сим1} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{к.пр1} \\ \underline{I}_{к.об1} \\ \underline{I}_{к.о1} \end{vmatrix}, \underline{I}_{к.сим2} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{к.пр2} \\ \underline{I}_{к.об2} \\ \underline{I}_{к.о2} \end{vmatrix} -$$

вектор-столбцы симметричных составляющих напряжений и токов 1-ой и 2-ой цепей соответственно в начале и конце линии;

$$\underline{A}_{сим} = \begin{vmatrix} \underline{A} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{A} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{A}_o \end{vmatrix}, \underline{A}_{сим12} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{A}_{o12} \end{vmatrix}, \underline{B}_{сим} = \begin{vmatrix} \underline{B} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{B} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{B}_o \end{vmatrix}, \underline{B}_{сим12} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{B}_{o12} \end{vmatrix},$$

$$\underline{C}_{сим} = \begin{vmatrix} \underline{C} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{C} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{C}_o \end{vmatrix}, \underline{C}_{сим12} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{C}_{o12} \end{vmatrix}, \underline{D}_{сим} = \begin{vmatrix} \underline{D} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{D} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{D}_o \end{vmatrix}, \underline{D}_{сим12} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{D}_{o12} \end{vmatrix}.$$

Применяя обратное преобразование, запишем систему (2.16) в фазных координатах

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{н.ф1} &= \underline{A}_{\phi} \underline{U}_{к.ф1} + \underline{A}_{\phi12} \underline{U}_{к.ф2} + \underline{B}_{\phi} \underline{I}_{к.ф1} + \underline{B}_{\phi12} \underline{I}_{к.ф2}, \\
\underline{U}_{н.ф2} &= \underline{A}_{\phi12} \underline{U}_{к.ф1} + \underline{A}_{\phi} \underline{U}_{к.ф2} + \underline{B}_{\phi12} \underline{I}_{к.ф1} + \underline{B}_{\phi} \underline{I}_{к.ф2}, \\
\underline{I}_{н.ф1} &= \underline{C}_{\phi} \underline{U}_{к.ф1} + \underline{C}_{\phi12} \underline{U}_{к.ф2} + \underline{D}_{\phi} \underline{I}_{к.ф1} + \underline{D}_{\phi12} \underline{I}_{к.ф2}, \\
\underline{I}_{н.ф2} &= \underline{C}_{\phi12} \underline{U}_{к.ф1} + \underline{C}_{\phi} \underline{U}_{к.ф2} + \underline{D}_{\phi12} \underline{I}_{к.ф1} + \underline{D}_{\phi} \underline{I}_{к.ф2},
\end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\text{где } \underline{U}_{н.ф1} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{н.а1} \\ \underline{U}_{н.б1} \\ \underline{U}_{н.с1} \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_{н.ф2} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{н.а2} \\ \underline{U}_{н.б2} \\ \underline{U}_{н.с2} \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_{к.ф1} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{к.а1} \\ \underline{U}_{к.б1} \\ \underline{U}_{к.с1} \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_{к.ф2} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{к.а2} \\ \underline{U}_{к.б2} \\ \underline{U}_{к.с2} \end{bmatrix}, \\
\underline{I}_{н.ф1} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{н.а1} \\ \underline{I}_{н.б1} \\ \underline{I}_{н.с1} \end{bmatrix}, \quad \underline{I}_{н.ф2} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{н.а2} \\ \underline{I}_{н.б2} \\ \underline{I}_{н.с2} \end{bmatrix}, \quad \underline{I}_{к.ф1} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{к.а1} \\ \underline{I}_{к.б1} \\ \underline{I}_{к.с1} \end{bmatrix}, \quad \underline{I}_{к.ф2} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{к.а2} \\ \underline{I}_{к.б2} \\ \underline{I}_{к.с2} \end{bmatrix} -$$

вектор-столбцы фазных напряжений и токов 1-ой и 2-ой цепей соответственно в начале и конце линии;

$$\begin{aligned}
\underline{A}_{\phi} &= \underline{S}_{\text{сим}} \underline{A}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \quad \underline{A}_{\phi12} = \underline{S}_{\text{сим}} \underline{A}_{\text{сим}12} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \quad \underline{B}_{\phi} = \underline{S}_{\text{сим}} \underline{B}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \quad \underline{B}_{\phi12} = \underline{S}_{\text{сим}} \underline{B}_{\text{сим}12} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \\
\underline{C}_{\phi} &= \underline{S}_{\text{сим}} \underline{C}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \quad \underline{C}_{\phi12} = \underline{S}_{\text{сим}} \underline{C}_{\text{сим}12} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \quad \underline{D}_{\phi} = \underline{S}_{\text{сим}} \underline{D}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \quad \underline{D}_{\phi12} = \underline{S}_{\text{сим}} \underline{D}_{\text{сим}12} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}.
\end{aligned}$$

И окончательно уравнения двухцепной линии (2.17) принимают вид

$$\begin{aligned}
\underline{U}_{н.ф6} &= \underline{A}_{\phi6} \underline{U}_{к.ф6} + \underline{B}_{\phi6} \underline{I}_{к.ф6}, \\
\underline{I}_{н.ф6} &= \underline{C}_{\phi6} \underline{U}_{к.ф6} + \underline{D}_{\phi6} \underline{I}_{к.ф6},
\end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\text{где } \underline{U}_{н.ф6} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{н.а1} \\ \underline{U}_{н.б1} \\ \underline{U}_{н.с1} \\ \underline{U}_{н.а2} \\ \underline{U}_{н.б2} \\ \underline{U}_{н.с2} \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_{к.ф6} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{к.а1} \\ \underline{U}_{к.б1} \\ \underline{U}_{к.с1} \\ \underline{U}_{к.а2} \\ \underline{U}_{к.б2} \\ \underline{U}_{к.с2} \end{bmatrix}, \quad \underline{I}_{н.ф6} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{н.а1} \\ \underline{I}_{н.б1} \\ \underline{I}_{н.с1} \\ \underline{I}_{н.а2} \\ \underline{I}_{н.б2} \\ \underline{I}_{н.с2} \end{bmatrix}, \quad \underline{I}_{к.ф6} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{к.а1} \\ \underline{I}_{к.б1} \\ \underline{I}_{к.с1} \\ \underline{I}_{к.а2} \\ \underline{I}_{к.б2} \\ \underline{I}_{к.с2} \end{bmatrix}, \quad - \text{ вектор-столбцы}$$

фазных напряжений и токов соответственно в начале и конце линии;

$$\underline{A}_{\phi6} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{\phi} & \underline{A}_{\phi12} \\ \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} \\ \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} \\ \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} \\ \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} \\ \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} \\ \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi12} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi\phi} & \underline{A}_{\phi} \end{bmatrix},$$

$$\underline{A}_\phi = \frac{\underline{A}_o + 2\underline{A}}{3} = \frac{0,5(\text{ch}\underline{\gamma}_{o1}\ell + \text{ch}\underline{\gamma}_{o2}\ell) + 2\text{ch}\underline{\gamma}\ell}{3},$$

$$\underline{A}_{\phi\phi} = \frac{\underline{A}_o - \underline{A}}{3} = \frac{0,5(\text{ch}\underline{\gamma}_{o1}\ell + \text{ch}\underline{\gamma}_{o2}\ell) - \text{ch}\underline{\gamma}\ell}{3}, \quad \underline{A}_{\phi12} = \frac{\underline{A}_{o12}}{3} = \frac{\text{ch}\underline{\gamma}_{o1}\ell - \text{ch}\underline{\gamma}_{o2}\ell}{6};$$

$$\underline{B}_{\phi6} = \begin{vmatrix} \underline{B}_\phi & \underline{B}_{\phi12} \\ \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_\phi \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{B}_\phi & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} \\ \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_\phi & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} \\ \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_\phi & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} \\ \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_\phi & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_{\phi\phi} \\ \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_\phi & \underline{B}_{\phi\phi} \\ \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi12} & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_{\phi\phi} & \underline{B}_\phi \end{bmatrix},$$

$$\underline{B}_\phi = \frac{\underline{B}_o + 2\underline{B}}{3} = \frac{0,5(\underline{Z}_{wo1}\text{sh}\underline{\gamma}_{o1}\ell + \underline{Z}_{wo2}\text{sh}\underline{\gamma}_{o2}\ell) + 2\underline{Z}_w\text{sh}\underline{\gamma}\ell}{3},$$

$$\underline{B}_{\phi\phi} = \frac{\underline{B}_o - \underline{B}}{3} = \frac{0,5(\underline{Z}_{wo1}\text{sh}\underline{\gamma}_{o1}\ell + \underline{Z}_{wo2}\text{sh}\underline{\gamma}_{o2}\ell) - \underline{Z}_w\text{sh}\underline{\gamma}\ell}{3},$$

$$\underline{B}_{\phi12} = \frac{\underline{B}_{o12}}{3} = \frac{\underline{Z}_{wo1}\text{sh}\underline{\gamma}_{o1}\ell - \underline{Z}_{wo2}\text{sh}\underline{\gamma}_{o2}\ell}{6};$$

$$\underline{C}_{\phi6} = \begin{vmatrix} \underline{C}_\phi & \underline{C}_{\phi12} \\ \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_\phi \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{C}_\phi & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} \\ \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_\phi & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} \\ \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_\phi & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} \\ \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_\phi & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_{\phi\phi} \\ \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_\phi & \underline{C}_{\phi\phi} \\ \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi12} & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_{\phi\phi} & \underline{C}_\phi \end{bmatrix}$$

$$\underline{C}_\phi = \frac{\underline{C}_o + 2\underline{C}}{3} = \frac{1}{6} \left(\frac{\text{sh}\underline{\gamma}_{o1}\ell}{\underline{Z}_{wo1}} + \frac{\text{sh}\underline{\gamma}_{o2}\ell}{\underline{Z}_{wo2}} \right) + \frac{2}{3} \frac{\text{sh}\underline{\gamma}\ell}{\underline{Z}_w},$$

$$\underline{C}_{\phi\phi} = \frac{\underline{C}_o - \underline{C}}{3} = \frac{1}{6} \left(\frac{\text{sh}\underline{\gamma}_{o1}\ell}{\underline{Z}_{wo1}} + \frac{\text{sh}\underline{\gamma}_{o2}\ell}{\underline{Z}_{wo2}} \right) - \frac{\text{sh}\underline{\gamma}\ell}{3\underline{Z}_w}, \quad \underline{C}_{\phi12} = \frac{\underline{C}_{o12}}{3} = \frac{\text{sh}\underline{\gamma}_{o1}\ell}{6\underline{Z}_{wo1}} - \frac{\text{sh}\underline{\gamma}_{o2}\ell}{6\underline{Z}_{wo2}};$$

$$\underline{D}_{\phi6} = \begin{vmatrix} \underline{D}_\phi & \underline{D}_{\phi12} \\ \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_\phi \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{D}_\phi & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} \\ \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_\phi & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} \\ \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_\phi & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} \\ \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_\phi & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_{\phi\phi} \\ \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_\phi & \underline{D}_{\phi\phi} \\ \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi12} & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_{\phi\phi} & \underline{D}_\phi \end{bmatrix} \quad \text{— матричные}$$

$\underline{D}_\phi = \underline{A}_\phi$, $\underline{D}_{\phi\phi} = \underline{A}_{\phi\phi}$, $\underline{D}_{\phi 12} = \underline{A}_{\phi 12}$ · фазные коэффициенты.

2.4 Матричная модель шунтирующих элементов

К шунтирующим элементам относятся нагрузка и шунтирующие устройства реактивной мощности, подключаемые параллельно к сети. Тяговая нагрузка замещается линеаризованной в окрестности номинального напряжения проводимостью, что обеспечивает достаточную точность при расчете режимов протяженной высоковольтной сети.

Рассмотрим наиболее характерные случаи подключения шунтирующих элементов к одноцепной линии и к двухцепной линии.

Схема подключения шунтирующего элемента к одноцепной линии показана на рисунке 2.5.

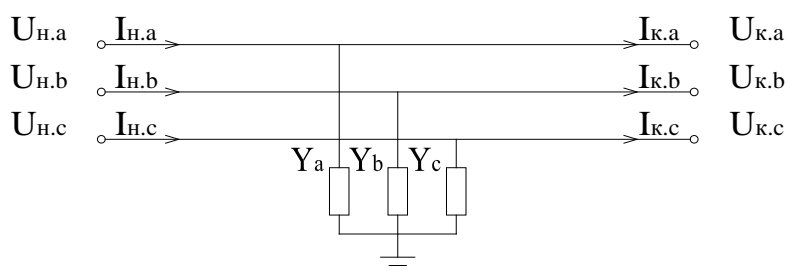


Рисунок 2.5– Шунтирующий элемент на одноцепной линии

Уравнения, определяющие режим работы шунтирующего элемента, имеют вид

$$\begin{vmatrix} \underline{U}_н \\ \underline{I}_н \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \underline{Y}_\phi & \mathbf{1}_3 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \underline{U}_к \\ \underline{I}_к \end{vmatrix}, \quad (2.19)$$

где $\underline{U}_n = \begin{bmatrix} \underline{U}_{n.a} \\ \underline{U}_{n.b} \\ \underline{U}_{n.c} \end{bmatrix}$, $\underline{U}_k = \begin{bmatrix} \underline{U}_{k.a} \\ \underline{U}_{k.b} \\ \underline{U}_{k.c} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_n = \begin{bmatrix} \underline{I}_{n.a} \\ \underline{I}_{n.b} \\ \underline{I}_{n.c} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_k = \begin{bmatrix} \underline{I}_{k.a} \\ \underline{I}_{k.b} \\ \underline{I}_{k.c} \end{bmatrix}$ – вектор-столбцы

соответственно комплексных величин напряжений и токов по концам шунтирующего элемента;

$\mathbf{1}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ – единичная матрица третьего порядка;

$\mathbf{0}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ – нулевая матрица третьего порядка;

$\underline{Y}_\phi = \begin{bmatrix} \underline{Y}_a & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_b & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_c \end{bmatrix}$ – матрица параметров шунтирующего элемента.

Схема подключения шунтирующих элементов к двухцепной линии показана на рисунке 2.6.

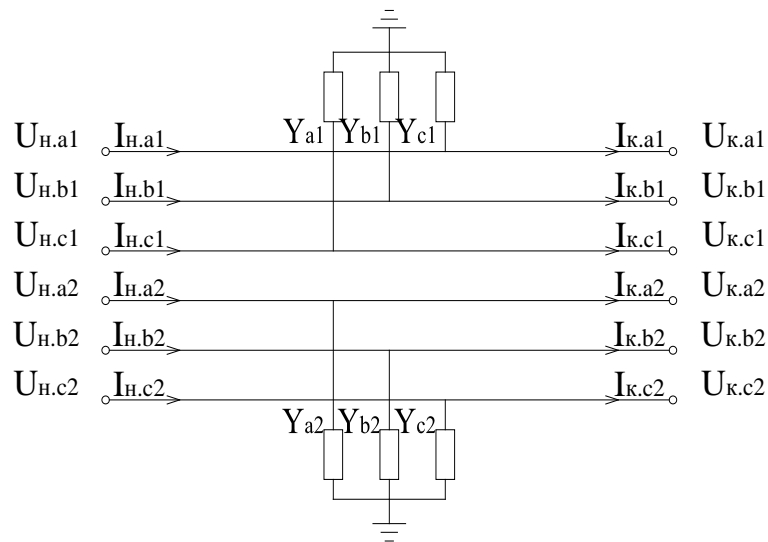


Рисунок 2.6– Шунтирующие элементы на двухцепной линии

Уравнения, определяющие режим работы шунтирующих элементов имеют вид

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{н.1} \\ \underline{U}_{н.2} \\ \underline{I}_{н.1} \\ \underline{I}_{н.2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \underline{Y}_{\phi 1} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \underline{Y}_{\phi 2} & \mathbf{0}_3 & \mathbf{1}_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_{к.1} \\ \underline{U}_{к.2} \\ \underline{I}_{к.1} \\ \underline{I}_{к.2} \end{pmatrix}, \quad (2.20)$$

где $\underline{U}_{н.1} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{н.а1} \\ \underline{U}_{н.б1} \\ \underline{U}_{н.с1} \end{pmatrix}$, $\underline{U}_{н.2} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{н.а2} \\ \underline{U}_{н.б2} \\ \underline{U}_{н.с2} \end{pmatrix}$, $\underline{U}_{к.1} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{к.а1} \\ \underline{U}_{к.б1} \\ \underline{U}_{к.с1} \end{pmatrix}$, $\underline{U}_{к.2} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{к.а2} \\ \underline{U}_{к.б2} \\ \underline{U}_{к.с2} \end{pmatrix}$, – вектор-столбцы

комплексных величин напряжений по концам шунтирующих элементов в 1-ой и 2-ой цепях;

где $\underline{I}_{н.1} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{н.а1} \\ \underline{I}_{н.б1} \\ \underline{I}_{н.с1} \end{pmatrix}$, $\underline{I}_{н.2} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{н.а2} \\ \underline{I}_{н.б2} \\ \underline{I}_{н.с2} \end{pmatrix}$, $\underline{I}_{к.1} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{к.а1} \\ \underline{I}_{к.б1} \\ \underline{I}_{к.с1} \end{pmatrix}$, $\underline{I}_{к.2} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{к.а2} \\ \underline{I}_{к.б2} \\ \underline{I}_{к.с2} \end{pmatrix}$, – вектор-столбцы

комплексных величин токов по концам шунтирующих элементов в 1-ой и 2-ой цепях;

$\underline{Y}_{\phi 1} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{а1} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{б1} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{с1} \end{pmatrix}$ – матрица параметров шунтирующего элемента,

подключённого к 1-ой цепи;

$\underline{Y}_{\phi 2} = \begin{pmatrix} \underline{Y}_{а2} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Y}_{б2} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Y}_{с2} \end{pmatrix}$ – матрица параметров шунтирующего элемента,

подключённого к 2-ой цепи.

2.5 Матричная модель автотрансформатора

Матричную модель автотрансформатора (АТ) в фазных координатах проще всего получается исходя из его модели в симметричных координатах. Упрощённая схема замещения автотрансформатора с третичной обмоткой имеет вид относительно симметричных составляющих, показанный на

рисунке 2.7. При этом принимается, что параметры этой схемы приведены к высокой стороне [55,65,66].

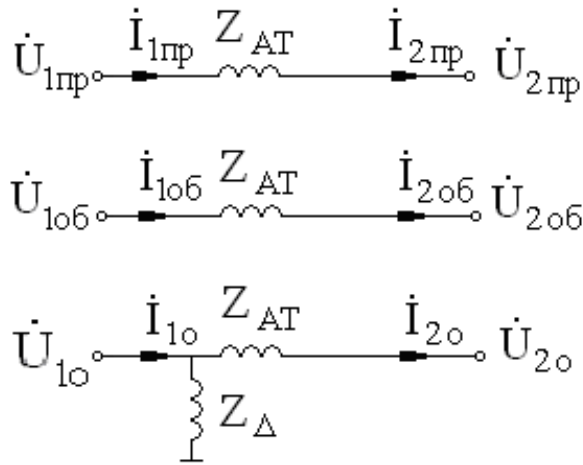


Рисунок 2.7 – Представление автотрансформатора 6-полюсником относительно симметричных составляющих

На этом рисунке \underline{Z}_{AT} представляет сопротивление рассеяния АТ с высокой стороны, а \underline{Z}_{Δ} – сопротивление рассеяния со стороны треугольника, приведенное к высокой стороне. Эти сопротивления определяются по паспортным данным АТ.

Рассматривая все три последовательности АТ как 6-полюсник, найдём матрицу его параметров относительно симметричных составляющих

$$\underline{M}_{\text{сим}} = \begin{vmatrix} \underline{A}_{\text{сим}} & \underline{B}_{\text{сим}} \\ \underline{C}_{\text{сим}} & \underline{D}_{\text{сим}} \end{vmatrix}, \quad (2.21)$$

$$\text{где } \underline{A}_{\text{сим}} = \underline{1}_3, \quad \underline{B}_{\text{сим}} = \underline{1}_3 \cdot \underline{Z}_{AT}, \quad \underline{C}_{\text{сим}} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\underline{Z}_{\Delta}} \end{vmatrix}, \quad \underline{D}_{\text{сим}} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \frac{\underline{Z}_{AT}}{\underline{Z}_{\Delta}} \end{vmatrix}.$$

Переход к фазным координатам осуществляется с помощью соотношений

$$\begin{aligned} \underline{A}_{\phi} &= \underline{S}_{\text{сим}} \underline{A}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, & \underline{B}_{\phi} &= \underline{S}_{\text{сим}} \underline{B}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, \\ \underline{C}_{\phi} &= \underline{S}_{\text{сим}} \underline{C}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}, & \underline{D}_{\phi} &= \underline{S}_{\text{сим}} \underline{D}_{\text{сим}} \underline{S}_{\text{сим}}^{-1}. \end{aligned}$$

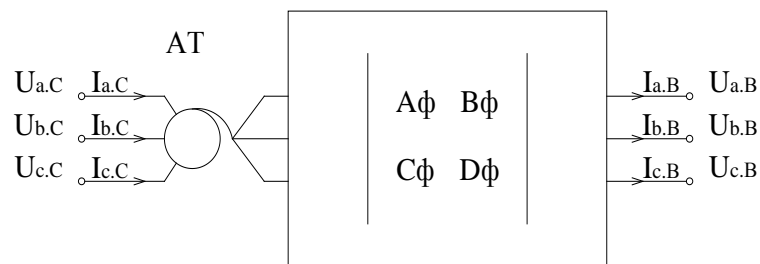
В результате имеем

$$\underline{\mathbf{M}}_{\phi} = \begin{vmatrix} \underline{\mathbf{A}}_{\phi} & \underline{\mathbf{B}}_{\phi} \\ \underline{\mathbf{C}}_{\phi} & \underline{\mathbf{D}}_{\phi} \end{vmatrix} \quad (2.22)$$

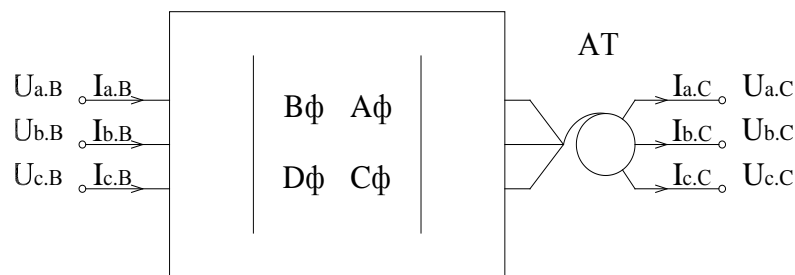
где $\underline{\mathbf{A}}_{\phi} = 1_3$, $\underline{\mathbf{B}}_{\phi} = 1_3 \cdot \underline{\mathbf{Z}}_{\text{AT}}$, $\underline{\mathbf{C}}_{\phi} = \frac{1}{3\underline{\mathbf{Z}}_{\Delta}} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}$, $\underline{\mathbf{D}}_{\phi} = \begin{vmatrix} \underline{\mathbf{D}}_{\phi} & \underline{\mathbf{D}}_{\phi\phi} & \underline{\mathbf{D}}_{\phi\phi} \\ \underline{\mathbf{D}}_{\phi\phi} & \underline{\mathbf{D}}_{\phi} & \underline{\mathbf{D}}_{\phi\phi} \\ \underline{\mathbf{D}}_{\phi\phi} & \underline{\mathbf{D}}_{\phi\phi} & \underline{\mathbf{D}}_{\phi} \end{vmatrix}$,

$$\underline{\mathbf{D}}_{\phi} = \frac{\underline{\mathbf{Z}}_{\text{AT}} + 3}{\underline{\mathbf{Z}}_{\Delta}}, \quad \underline{\mathbf{D}}_{\phi\phi} = \frac{\underline{\mathbf{Z}}_{\text{AT}} - 1}{3}.$$

Если расчеты режимов проводятся с моделированием сети на каждой ступени напряжения, то необходимо учитывать особенности моделирования повышающего и понижающего автотрансформаторов (Рисунок 2.8).



а)



б)

Рисунок 2.8 – Расчётные схемы для повышающего и понижающего автотрансформаторов: а – повышающий АТ; б – понижающий АТ

Матрица коэффициентов трансформации, связывающая фазные напряжения и токи по концам идеального повышающего АТ, равна

$$\underline{K}_{C-B} = \begin{vmatrix} \frac{1}{\underline{K}_{AT}} \cdot \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \underline{K}_{AT} \cdot \mathbf{1}_3 \end{vmatrix},$$

где $\underline{K}_{AT} = \frac{\underline{U}_B}{\underline{U}_C}$ – коэффициент трансформации АТ.

Соответственно матрица параметров повышающего АТ запишется

$$\underline{M}_{\phi,C-B} = \underline{K}_{C-B} \underline{M}_{\phi} = \begin{vmatrix} \frac{1}{\underline{K}_{AT}} \cdot \underline{A}_{\phi} & \frac{1}{\underline{K}_{AT}} \cdot \underline{B}_{\phi} \\ \underline{K}_{AT} \cdot \underline{C}_{\phi} & \underline{K}_{AT} \cdot \underline{D}_{\phi} \end{vmatrix}. \quad (2.23)$$

Для идеального понижающего АТ матрица коэффициентов трансформации, связывающая фазные напряжения и токи по концам, равна

$$\underline{K}_{B-C} = \begin{vmatrix} \underline{K}_{AT} \cdot \mathbf{1}_3 & \mathbf{0}_3 \\ \mathbf{0}_3 & \frac{1}{\underline{K}_{AT}} \cdot \mathbf{1}_3 \end{vmatrix}.$$

Соответственно матрица параметров понижающего АТ запишется

$$\underline{M}_{\phi,C-B} = \underline{M}_{\phi} \underline{K}_{B-C} = \begin{vmatrix} \underline{K}_{AT} \cdot \underline{A}_{\phi} & \frac{1}{\underline{K}_{AT}} \cdot \underline{B}_{\phi} \\ \underline{K}_{AT} \cdot \underline{C}_{\phi} & \frac{1}{\underline{K}_{AT}} \cdot \underline{D}_{\phi} \end{vmatrix}. \quad (2.24)$$

2.6 Эквивалентирование двухцепного участка сети при параллельной работе цепей

При расчёте режимов протяжённой сети внешнего электроснабжения для объединения двухцепных и одноцепных участков в одну модель, возникает необходимость преобразования двухцепного участка сети, содержащего в общем случае на своем протяжении нагрузку к одноцепному виду. Решение данной задачи сводится к определению матричных коэффициентов эквивалента через заданные элементы матричных коэффициентов исходного двухцепного участка сети. Метод преобразования

двухцепного участка сети к одноцепному виду получен впервые и составляет научную новизну работы [64].

Рассмотрим параллельную работу цепей двухцепного участка сети при объединении цепей на узловых подстанциях, как это показано на рисунке 2.9.

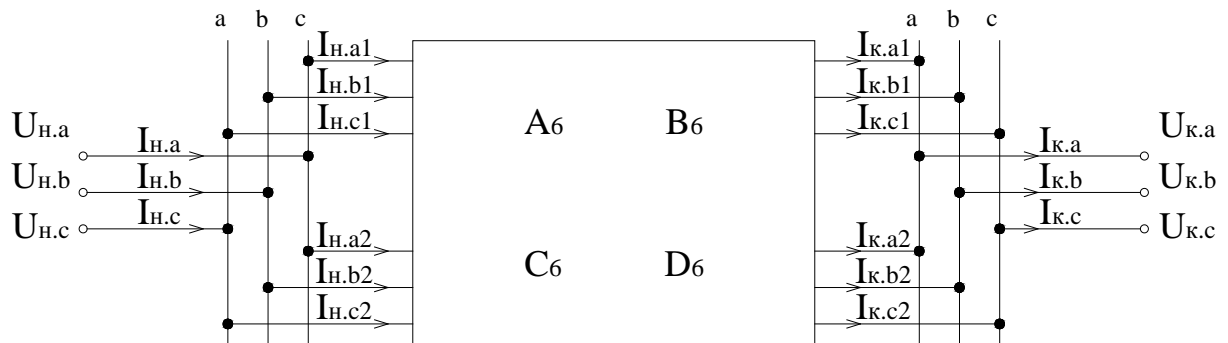


Рисунок 2.9 – Двухцепной участок сети при параллельной работе цепей

При расчёте режимов протяжённой сети возникает потребность эквивалентирования двухцепного участка сети к одноцепному виду (Рисунок 2.10).

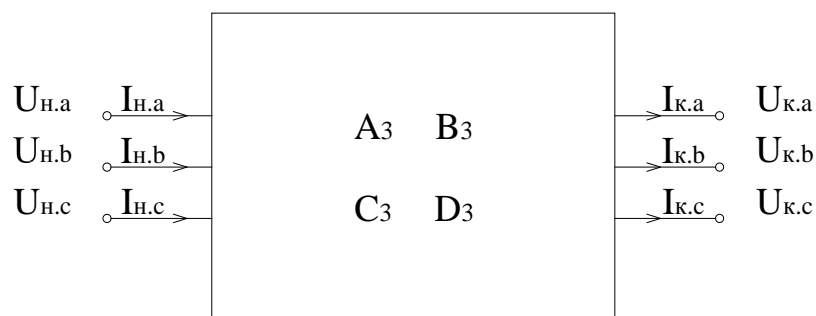


Рисунок 2.10 – Одноцепной эквивалент двухцепного участка сети.

Решение данной задачи приведения двухцепного участка сети к одноцепному эквиваленту сводится к определению матричных

коэффициентов эквивалента через заданные элементы матричных коэффициентов исходного двухцепного участка сети.

Связь между режимными параметрами по концам двухцепного участка сети в фазных координатах может быть представлена в следующей форме

$$\begin{aligned} \underline{U}_{н.6} &= \underline{A}_6 \underline{U}_{к.6} + \underline{B}_6 \underline{I}_{к.6}, \\ \underline{I}_{н.6} &= \underline{C}_6 \underline{U}_{к.6} + \underline{D}_6 \underline{I}_{к.6} \end{aligned} \quad (2.25)$$

где $\underline{U}_{н.6} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{н.а1} \\ \underline{U}_{н.б1} \\ \underline{U}_{н.с1} \\ \underline{U}_{н.а2} \\ \underline{U}_{н.б2} \\ \underline{U}_{н.с2} \end{bmatrix}$, $\underline{U}_{к.6} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{к.а1} \\ \underline{U}_{к.б1} \\ \underline{U}_{к.с1} \\ \underline{U}_{к.а2} \\ \underline{U}_{к.б2} \\ \underline{U}_{к.с2} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_{н.6} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{н.а1} \\ \underline{I}_{н.б1} \\ \underline{I}_{н.с1} \\ \underline{I}_{н.а2} \\ \underline{I}_{н.б2} \\ \underline{I}_{н.с2} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_{к.6} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{к.а1} \\ \underline{I}_{к.б1} \\ \underline{I}_{к.с1} \\ \underline{I}_{к.а2} \\ \underline{I}_{к.б2} \\ \underline{I}_{к.с2} \end{bmatrix}$ – вектор-столбцы фазных

напряжений и токов соответственно в начале и конце двухцепного участка сети;

\underline{A}_6 , \underline{B}_6 , \underline{C}_6 , \underline{D}_6 – матричные коэффициенты 6-го порядка для двухцепного участка сети.

Уравнения, определяющие режим в одноцепном эквиваленте, записываются

$$\begin{aligned} \underline{U}_н &= \underline{A}_3 \underline{U}_к + \underline{B}_3 \underline{I}_к \\ \underline{I}_н &= \underline{C}_3 \underline{U}_к + \underline{D}_3 \underline{I}_к \end{aligned} \quad (2.26)$$

где $\underline{U}_н = \begin{bmatrix} \underline{U}_{н.а} \\ \underline{U}_{н.б} \\ \underline{U}_{н.с} \end{bmatrix}$, $\underline{U}_к = \begin{bmatrix} \underline{U}_{к.а} \\ \underline{U}_{к.б} \\ \underline{U}_{к.с} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_н = \begin{bmatrix} \underline{I}_{н.а} \\ \underline{I}_{н.б} \\ \underline{I}_{н.с} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_к = \begin{bmatrix} \underline{I}_{к.а} \\ \underline{I}_{к.б} \\ \underline{I}_{к.с} \end{bmatrix}$ – вектор-столбцы фазных

напряжений и токов соответственно в начале и конце одноцепного эквивалента;

\underline{A}_3 , \underline{B}_3 , \underline{C}_3 , \underline{D}_3 – матричные коэффициенты 3-го порядка для одноцепного эквивалента.

Из первого уравнения системы (2.25) следует, что

$$\underline{I}_{k,6} = \underline{B}_6^{-1} \underline{U}_{n,6} - \underline{B}_6^{-1} \underline{A}_6 \underline{U}_{k,6}. \quad (2.27)$$

Введём следующие обозначения

$$\underline{Y}_1 = \underline{B}_6^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1,11} & \underline{Y}_{1,12} \\ \underline{Y}_{1,21} & \underline{Y}_{1,22} \end{bmatrix}, \quad \underline{Y}_2 = \underline{B}_6^{-1} \underline{A}_6 = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{2,11} & \underline{Y}_{2,12} \\ \underline{Y}_{2,21} & \underline{Y}_{2,22} \end{bmatrix},$$

где $\underline{Y}_{1,11} \dots \underline{Y}_{2,22}$ – соответствующие подматрицы 3-го порядка.

Перепишем уравнение (2.27) в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{k,1} \\ \underline{I}_{k,2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1,11} & \underline{Y}_{1,12} \\ \underline{Y}_{1,21} & \underline{Y}_{1,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{n,1} \\ \underline{U}_{n,2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Y}_{2,11} & \underline{Y}_{2,12} \\ \underline{Y}_{2,21} & \underline{Y}_{2,22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{k,1} \\ \underline{U}_{k,2} \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

$$\text{где } \underline{I}_{k,1} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{k,a1} \\ \underline{I}_{k,b1} \\ \underline{I}_{k,c1} \end{bmatrix}, \quad \underline{I}_{k,2} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{k,a2} \\ \underline{I}_{k,b2} \\ \underline{I}_{k,c2} \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_{n,1} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{n,a1} \\ \underline{U}_{n,b1} \\ \underline{U}_{n,c1} \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_{n,2} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{n,a2} \\ \underline{U}_{n,b2} \\ \underline{U}_{n,c2} \end{bmatrix}, \quad \underline{U}_{k,1} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{k,a1} \\ \underline{U}_{k,b1} \\ \underline{U}_{k,c1} \end{bmatrix},$$

$$\underline{U}_{k,2} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{k,a2} \\ \underline{U}_{k,b2} \\ \underline{U}_{k,c2} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{вектор-столбцы соответствующих фазных токов и}$$

напряжений для 1-ой и 2-ой цепей.

При параллельном соединении цепей имеют место следующие условия

$$\underline{U}_{n,1} = \underline{U}_{n,2} = \underline{U}_n, \quad \underline{U}_{k,1} = \underline{U}_{k,2} = \underline{U}_k, \quad \underline{I}_n = \underline{I}_{n,1} + \underline{I}_{n,2}, \quad \underline{I}_k = \underline{I}_{k,1} + \underline{I}_{k,2}. \quad (2.29)$$

Учитывая (2.29) из (2.28) находим

$$\underline{I}_k = \underline{Y}_{1\varepsilon} \underline{U}_n - \underline{Y}_{2\varepsilon} \underline{U}_k, \quad (2.30)$$

где

$$\underline{Y}_{1\varepsilon} = \underline{Y}_{1,11} + \underline{Y}_{1,12} + \underline{Y}_{1,21} + \underline{Y}_{1,22},$$

$$\underline{Y}_{2\varepsilon} = \underline{Y}_{2,11} + \underline{Y}_{2,12} + \underline{Y}_{2,21} + \underline{Y}_{2,22}.$$

С другой стороны из первого уравнения системы (2.26) следует

$$\underline{I}_k = \underline{B}_3^{-1} \underline{U}_n - \underline{B}_3^{-1} \underline{A}_3 \underline{U}_k \quad (2.31)$$

Из сопоставления (2.30) и (2.31) следует

$$\underline{\mathbf{B}}_3^{-1} = \underline{\mathbf{Y}}_{1\varepsilon}, \quad \underline{\mathbf{B}}_3^{-1} \underline{\mathbf{A}}_3 = \underline{\mathbf{Y}}_{2\varepsilon}.$$

И в результате имеем

$$\underline{\mathbf{A}}_3 = \underline{\mathbf{Y}}_{1\varepsilon}^{-1} \underline{\mathbf{Y}}_{2\varepsilon}, \quad \underline{\mathbf{B}}_3 = \underline{\mathbf{Y}}_{1\varepsilon}. \quad (2.32)$$

Найдем далее коэффициенты $\underline{\mathbf{C}}_3$ и $\underline{\mathbf{D}}_3$ для одноцепного эквивалентного. Из системы (2.25) выразим вектор-столбец токов в начале линии через вектор-столбцы напряжений по концам линии

$$\underline{\mathbf{I}}_{н.6} = \underline{\mathbf{D}}_6 \underline{\mathbf{B}}_6^{-1} \underline{\mathbf{U}}_{н.6} + (\underline{\mathbf{C}}_6 - \underline{\mathbf{D}}_6 \underline{\mathbf{B}}_6^{-1} \underline{\mathbf{A}}_6) \underline{\mathbf{U}}_{к.6} \quad (2.33)$$

Введём следующие обозначения

$$\underline{\mathbf{Y}}_3 = \underline{\mathbf{D}}_6 \underline{\mathbf{B}}_6^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{3.11} & \underline{\mathbf{Y}}_{3.12} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{3.21} & \underline{\mathbf{Y}}_{3.22} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{Y}}_4 = \underline{\mathbf{C}}_6 - \underline{\mathbf{D}}_6 \underline{\mathbf{B}}_6^{-1} \underline{\mathbf{A}}_6 = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{4.11} & \underline{\mathbf{Y}}_{4.12} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{4.21} & \underline{\mathbf{Y}}_{4.22} \end{bmatrix},$$

где $\underline{\mathbf{Y}}_{3.11} \dots \underline{\mathbf{Y}}_{4.22}$ – соответствующие подматрицы 3-го порядка.

Перепишем уравнение (2.33) в развернутой форме

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_{н.1} \\ \underline{\mathbf{I}}_{н.2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{3.11} & \underline{\mathbf{Y}}_{3.12} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{3.21} & \underline{\mathbf{Y}}_{3.22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{н.1} \\ \underline{\mathbf{U}}_{н.2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{Y}}_{4.11} & \underline{\mathbf{Y}}_{4.12} \\ \underline{\mathbf{Y}}_{4.21} & \underline{\mathbf{Y}}_{4.22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{к.1} \\ \underline{\mathbf{U}}_{к.2} \end{bmatrix}, \quad (2.34)$$

$$\text{где } \underline{\mathbf{I}}_{н.1} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_{н.а1} \\ \underline{\mathbf{I}}_{н.б1} \\ \underline{\mathbf{I}}_{н.с1} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{I}}_{н.2} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_{н.а2} \\ \underline{\mathbf{I}}_{н.б2} \\ \underline{\mathbf{I}}_{н.с2} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{U}}_{н.1} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{н.а1} \\ \underline{\mathbf{U}}_{н.б1} \\ \underline{\mathbf{U}}_{н.с1} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{U}}_{н.2} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{н.а2} \\ \underline{\mathbf{U}}_{н.б2} \\ \underline{\mathbf{U}}_{н.с2} \end{bmatrix}, \quad \underline{\mathbf{U}}_{к.1} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{к.а1} \\ \underline{\mathbf{U}}_{к.б1} \\ \underline{\mathbf{U}}_{к.с1} \end{bmatrix},$$

$$\underline{\mathbf{U}}_{к.2} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{U}}_{к.а2} \\ \underline{\mathbf{U}}_{к.б2} \\ \underline{\mathbf{U}}_{к.с2} \end{bmatrix} \quad - \quad \text{вектор-столбцы соответствующих фазных токов и}$$

напряжений для 1-ой и 2-ой цепей.

Учитывая граничные условия (2.29), отражающие параллельность включения цепей, из (2.34) следует

$$\underline{\mathbf{I}}_н = \underline{\mathbf{Y}}_{3\varepsilon} \underline{\mathbf{U}}_н + \underline{\mathbf{Y}}_{4\varepsilon} \underline{\mathbf{U}}_к, \quad (2.35)$$

$$\text{где } \underline{\mathbf{Y}}_{3\varepsilon} = \underline{\mathbf{Y}}_{3.11} + \underline{\mathbf{Y}}_{3.12} + \underline{\mathbf{Y}}_{3.21} + \underline{\mathbf{Y}}_{3.22}, \quad \underline{\mathbf{Y}}_{4\varepsilon} = \underline{\mathbf{Y}}_{4.11} + \underline{\mathbf{Y}}_{4.12} + \underline{\mathbf{Y}}_{4.21} + \underline{\mathbf{Y}}_{4.22}.$$

Из системы (2.26) для одноцепного эквивалента следует

$$\underline{I}_H = \underline{D}_3 \underline{B}_3^{-1} \underline{U}_H + (\underline{C}_3 - \underline{D}_3 \underline{B}_3^{-1} \underline{A}_3) \underline{U}_K. \quad (2.36)$$

Из сопоставления (2.35) и (2.36) находим

$$\underline{D}_3 \underline{B}_3^{-1} = \underline{Y}_{3Э}, \quad \underline{C}_3 - \underline{D}_3 \underline{B}_3^{-1} \underline{A}_3 = \underline{Y}_{4Э}.$$

И в результате имеем

$$\underline{C}_3 = \underline{Y}_{4Э} + \underline{Y}_{3Э} \underline{Y}_{1Э}^{-1} \underline{Y}_{2Э}, \quad \underline{D}_3 = \underline{Y}_{3Э} \underline{Y}_{1Э}^{-1}. \quad (2.37)$$

В общем случае должно выполняться условие

$$\underline{A}_3 \underline{D}_3^T - \underline{B}_3 \underline{C}_3^T = \mathbf{1}_3 \quad (2.38)$$

которое может быть использовано для контроля расчетов.

В случае двух независимых цепей (Рисунок 2.11) эквивалентирование осуществляется с использованием П-образных схем замещения.

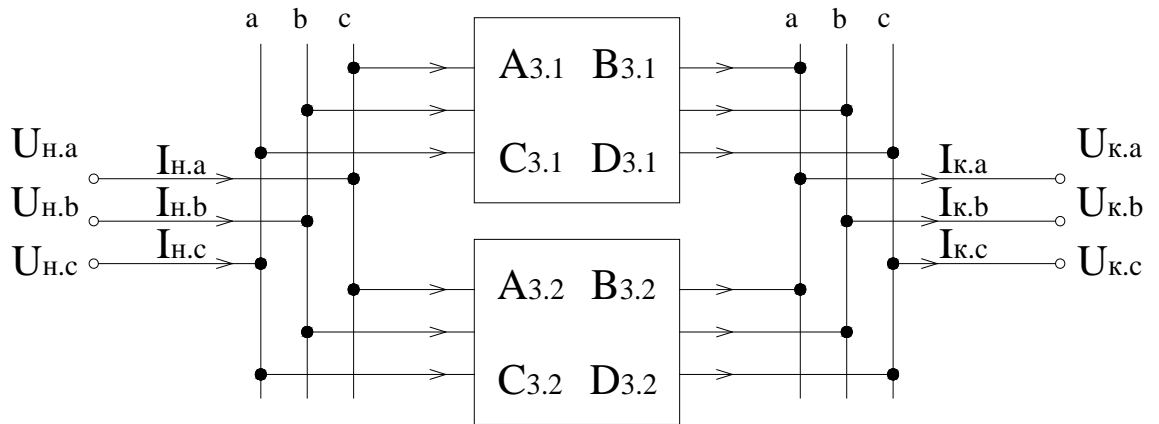


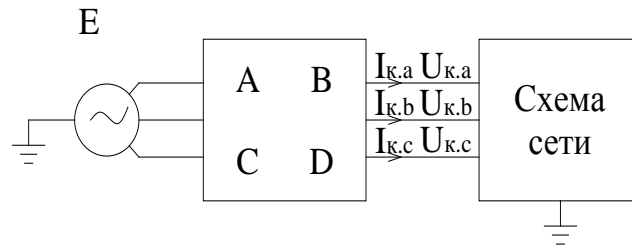
Рисунок 2.11 – Двухцепной участок сети при параллельной работе независимых цепей

В результате можно получить следующие выражения для эквивалентных матриц одноцепного участка

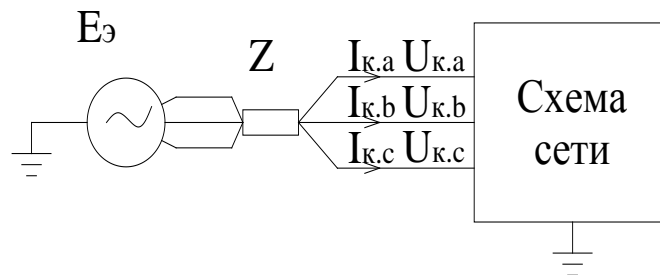
$$\begin{aligned} \underline{A}_3 &= (\underline{B}_{3.1}^{-1} + \underline{B}_{3.2}^{-1})^{-1} (\underline{B}_{3.1}^{-1} \underline{A}_{3.1} + \underline{B}_{3.2}^{-1} \underline{A}_{3.2}), \\ \underline{B}_3 &= (\underline{B}_{3.1}^{-1} + \underline{B}_{3.2}^{-1})^{-1}, \\ \underline{C}_3 &= \underline{C}_{3.1} + \underline{C}_{3.2} - \\ &\quad - \underline{D}_{3.1} \underline{B}_{3.1}^{-1} \underline{A}_{3.1} - \underline{D}_{3.2} \underline{B}_{3.2}^{-1} \underline{A}_{3.2} + (\underline{D}_{3.1} \underline{B}_{3.1}^{-1} + \underline{D}_{3.2} \underline{B}_{3.2}^{-1}) (\underline{B}_{3.1}^{-1} + \underline{B}_{3.2}^{-1})^{-1} (\underline{B}_{3.1}^{-1} \underline{A}_{3.1} + \underline{B}_{3.2}^{-1} \underline{A}_{3.2}) \\ \underline{D}_3 &= (\underline{D}_{3.1} \underline{B}_{3.1}^{-1} + \underline{D}_{3.2} \underline{B}_{3.2}^{-1}) (\underline{B}_{3.1}^{-1} + \underline{B}_{3.2}^{-1})^{-1}. \end{aligned} \quad (2.39)$$

2.7 Эквивалентирование примыкающих систем

При расчётах режимов сети возникает необходимость эквивалентирования примыкающих систем [65] относительно заданного узла, как это показано на рисунке 2.12 .



а)



б)

Рисунок 2.12 – Эквивалентирование примыкающей системы относительно заданного узла: а – исходная схема; б – эквивалентная схема.

В общем случае ЭДС системы связана с заданным узлом произвольной схемой, которая может быть приведена к 6-полюснику, который описывается матричными коэффициентами \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} 3-го порядка.

Уравнение 6-полюсника, определяющее связь между ЭДС и режимными параметрами заданного узла, имеет вид

$$\underline{E} = \underline{A}\underline{U}_k + \underline{B}\underline{I}_k, \quad (2.40)$$

где $\underline{E} = \begin{bmatrix} \underline{E}_a \\ \underline{E}_b \\ \underline{E}_c \end{bmatrix}$, $\underline{U}_k = \begin{bmatrix} \underline{U}_{k.a} \\ \underline{U}_{k.b} \\ \underline{U}_{k.c} \end{bmatrix}$, $\underline{I}_k = \begin{bmatrix} \underline{I}_{k.a} \\ \underline{I}_{k.b} \\ \underline{I}_{k.c} \end{bmatrix}$ – вектор-столбцы ЭДС и соответствующих

фазных токов и напряжений заданного узла.

Преобразуем уравнение (2.40) к следующему виду

$$\underline{A}^{-1}\underline{E} = \underline{U}_k + \underline{A}^{-1}\underline{B}\underline{I}_k. \quad (2.41)$$

С другой стороны для эквивалентной схемы (Рисунок 2.12б) справедливо соотношение

$$\underline{E}_\varnothing = \underline{U}_k + \underline{Z}\underline{I}_k. \quad (2.42)$$

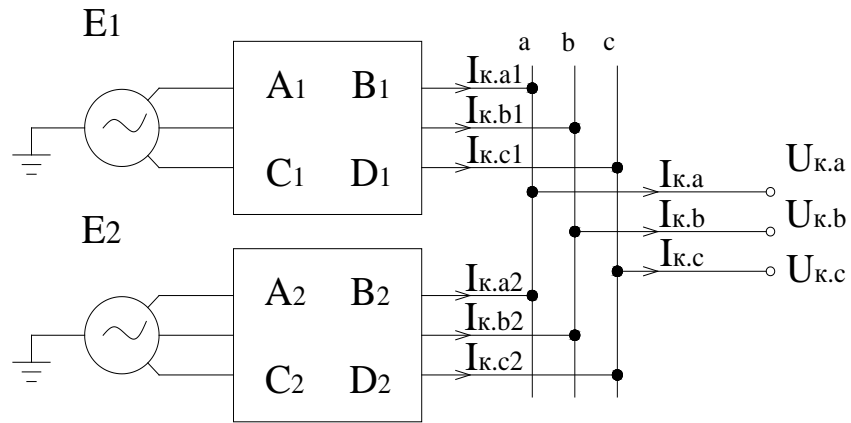
Из сопоставления (2.41) и (2.42) следует, что

$\underline{E}_\varnothing = \underline{A}^{-1}\underline{E}$ – вектор-столбец эквивалентной ЭДС, равный вектор-столбцу напряжения в режиме холостого хода;

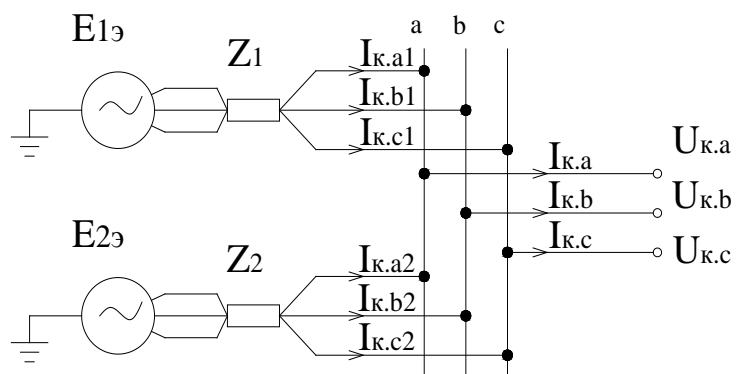
$\underline{Z} = \underline{A}^{-1}\underline{B}$ – матричное входное сопротивление примыкающей системы относительно заданного узла.

Полученный результат можно трактовать как запись в матричной форме теоремы об эквивалентном генераторе [49].

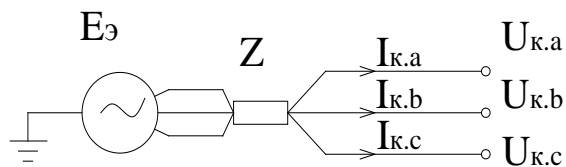
Рассмотрим случай эквивалентирования примыкающих систем, когда к заданному узлу примыкают две системы (Рисунок 2.13).



а)



б)



в)

Рисунок 2.13– Эквивалентирование примыкающих систем: а – исходная схема; б – эквивалентирование примыкающих систем по методу эквивалентного генератора; в – приведение к эквивалентной примыкающей системе.

Каждая из примыкающих систем приводится к виду, показанному на рисунке 2.13б, и соответственно описывается соотношениями

$$\begin{aligned}\underline{E}_{1\mathcal{E}} &= \underline{U}_k + \underline{Z}_1 \underline{I}_{k1} \\ \underline{E}_{2\mathcal{E}} &= \underline{U}_k + \underline{Z}_2 \underline{I}_{k2},\end{aligned}\quad (2.43)$$

где $\underline{E}_{1\mathcal{E}} = \underline{A}_1^{-1} \underline{E}_1$, $\underline{E}_{2\mathcal{E}} = \underline{A}_2^{-1} \underline{E}_2$ – вектор-столбцы эквивалентных ЭДС соответственно для 1-ой и 2-ой примыкающих систем;

$\underline{Z}_1 = \underline{A}_1^{-1} \underline{B}_1$, $\underline{Z}_2 = \underline{A}_2^{-1} \underline{B}_2$ – матричные входные сопротивления для 1-ой и 2-ой примыкающих систем относительно заданного узла.

Учитывая, что

$$\underline{I}_k = \underline{I}_{k1} + \underline{I}_{k2},$$

и подставляя в это соотношение вектор-столбцы токов из (2.83), получим

$$\left(\underline{Z}_1^{-1} + \underline{Z}_2^{-1}\right)^{-1} \left(\underline{Z}_1^{-1} \underline{E}_{1\mathcal{E}} + \underline{Z}_2^{-1} \underline{E}_{2\mathcal{E}}\right) = \underline{U}_k + \left(\underline{Z}_1^{-1} + \underline{Z}_2^{-1}\right)^{-1} \underline{I}_k. \quad (2.44)$$

С другой стороны для эквивалентной примыкающей системы (Рисунок 2.13в) справедливо соотношение

$$\underline{E}_{\mathcal{E}} = \underline{U}_k + \underline{Z} \underline{I}_k. \quad (2.45)$$

Из сопоставления соотношений (2.44) и (2.45) определяется вектор-столбец эквивалентной ЭДС и эквивалентное матричное входное сопротивление примыкающих систем относительно заданного узла

$$\begin{aligned}\underline{E}_{\mathcal{E}} &= \left(\underline{B}_1^{-1} \underline{A}_1 + \underline{B}_2^{-1} \underline{A}_2\right)^{-1} \left(\underline{B}_1^{-1} \underline{E}_1 + \underline{B}_2^{-1} \underline{E}_2\right), \\ \underline{Z}_{\mathcal{E}} &= \left(\underline{B}_1^{-1} \underline{A}_1 + \underline{B}_2^{-1} \underline{A}_2\right)^{-1}.\end{aligned}\quad (2.46)$$

2.8 Преобразование треугольной схемы шестиполюсников в звезду

При проведении расчетов матричным методом возникает потребность преобразования треугольной схемы шестиполюсников (Рисунок 2.14) в звезду.

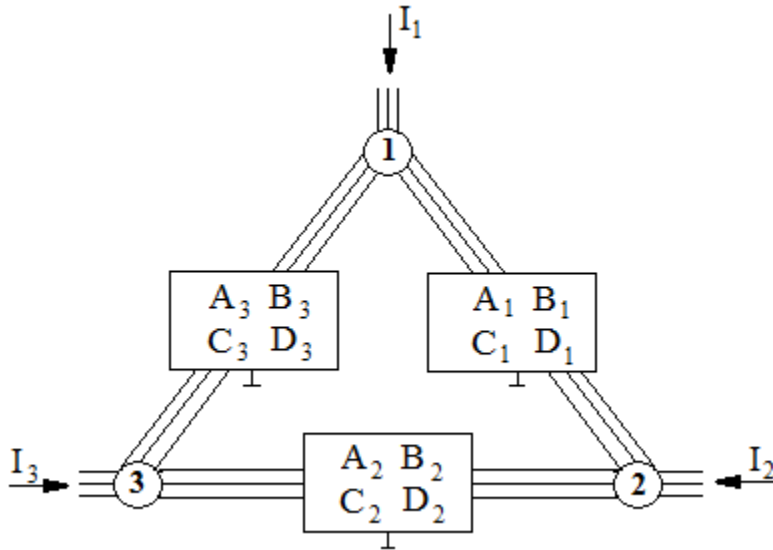


Рисунок 2.14 - Треугольная схема шестиполюсников

Шестиполюсники исходной схемы характеризуются матричными фазными коэффициентами

$$\underline{A}_i = \begin{vmatrix} \underline{A}_{iaa} & \underline{A}_{iab} & \underline{A}_{iac} \\ \underline{A}_{iba} & \underline{A}_{ibb} & \underline{A}_{ibc} \\ \underline{A}_{ica} & \underline{A}_{icb} & \underline{A}_{icc} \end{vmatrix}; \quad \underline{B}_i = \begin{vmatrix} \underline{B}_{iaa} & \underline{B}_{iab} & \underline{B}_{iac} \\ \underline{B}_{iba} & \underline{B}_{ibb} & \underline{B}_{ibc} \\ \underline{B}_{ica} & \underline{B}_{icb} & \underline{B}_{icc} \end{vmatrix}$$

$$\underline{C}_i = \begin{vmatrix} \underline{C}_{iaa} & \underline{C}_{iab} & \underline{C}_{iac} \\ \underline{C}_{iba} & \underline{C}_{ibb} & \underline{C}_{ibc} \\ \underline{C}_{ica} & \underline{C}_{icb} & \underline{C}_{icc} \end{vmatrix}; \quad \underline{D}_i = \begin{vmatrix} \underline{D}_{iaa} & \underline{D}_{iab} & \underline{D}_{iac} \\ \underline{D}_{iba} & \underline{D}_{ibb} & \underline{D}_{ibc} \\ \underline{D}_{ica} & \underline{D}_{icb} & \underline{D}_{icc} \end{vmatrix}$$

где $i=1,2,3$.

Представим каждый шестиполюсник в виде П-образной схемы замещения, как это показано на рисунке 2.15. Параметры П-образных схем замещения для i -го шестиполюсника определяются известными соотношениями

$$\begin{aligned} \underline{Z}_i &= \underline{B}_i, \\ \underline{Y}_{ii} &= (\underline{D}_i - 1_3)\underline{B}_i^{-1}, \\ \underline{Y}_{ij} &= \underline{B}_i^{-1}(\underline{A}_i - 1_3) \end{aligned} \quad (2.47)$$

где $\mathbf{1}_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – единичная матрица третьего порядка.

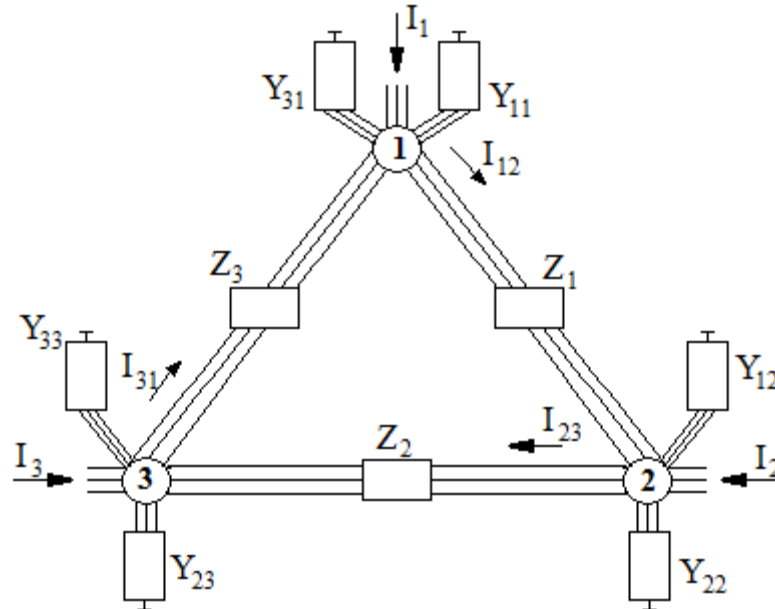


Рисунок 2.15 - Треугольная схема шестиполосников, представленных П-образными схемами замещения

Далее согласно законом Кирхгофа имеем следующие соотношения в матричной форме для схемы на рисунке 2.15

$$\underline{Z}_1 \underline{I}_{12} + \underline{Z}_2 \underline{I}_{12} + \underline{Z}_3 \underline{I}_{31} = 0, \quad (2.48)$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_1 &= \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31}, \\ \underline{I}_2 &= \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12}, \\ \underline{I}_3 &= \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23}, \end{aligned} \quad (2.49)$$

где $\underline{I}_1 = \begin{pmatrix} \underline{I}_{1a} \\ \underline{I}_{1b} \\ \underline{I}_{1c} \end{pmatrix}$, $\underline{I}_2 = \begin{pmatrix} \underline{I}_{2a} \\ \underline{I}_{2b} \\ \underline{I}_{2c} \end{pmatrix}$, $\underline{I}_3 = \begin{pmatrix} \underline{I}_{3a} \\ \underline{I}_{3b} \\ \underline{I}_{3c} \end{pmatrix}$ - вектор-столбцы токов, подтекающие к

узлам треугольника; $\underline{I}_{12} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{12a} \\ \underline{I}_{12b} \\ \underline{I}_{12c} \end{pmatrix}$, $\underline{I}_{23} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{23a} \\ \underline{I}_{23b} \\ \underline{I}_{23c} \end{pmatrix}$, $\underline{I}_{31} = \begin{pmatrix} \underline{I}_{31a} \\ \underline{I}_{31b} \\ \underline{I}_{31c} \end{pmatrix}$ - вектор-столбцы токов в

соответствующих ветвях треугольника.

Для перехода к схеме звезды (Рисунок 2.16) осуществим следующие операции.

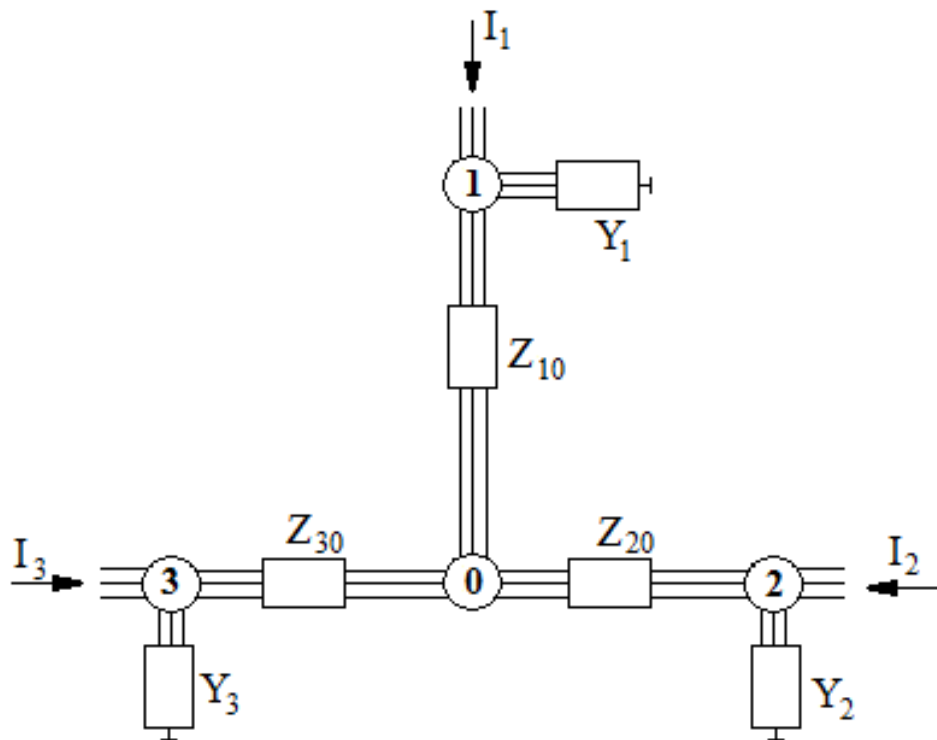


Рисунок 2.16 - Треугольная схема шестиполусников, преобразованная в звезду

Выразив из (2.49) вектор-столбцы токов \underline{I}_{23} и \underline{I}_{31} и подставив их в (2.48), найдем

$$\underline{Z}_\Delta \underline{I}_{12} + \underline{Z}_2 \underline{I}_2 - \underline{Z}_3 \underline{I}_1 = 0, \quad (2.50)$$

где $\underline{Z}_\Delta = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3$.

Найдя из (2.50) вектор-столбец токов в ветви 1-2 треугольника

$$\underline{I}_{12} = \underline{Z}_{\Delta}^{-1}(\underline{Z}_3 \underline{I}_1 - \underline{Z}_2 \underline{I}_2)$$

и учитывая соотношение для падения напряжения в ветви треугольника 1-2

$$\underline{U}_{12} = \underline{Z}_1 \underline{I}_{12},$$

получим

$$\underline{U}_{12} = \underline{Z}_1 \underline{Z}_{\Delta}^{-1} \underline{Z}_3 \underline{I}_1 - \underline{Z}_1 \underline{Z}_{\Delta}^{-1} \underline{Z}_2 \underline{I}_2. \quad (2.51)$$

С другой стороны, из схемы звезды (Рисунок 2.16) напряжение между узлами 1 и 2 имеет вид

$$\underline{U}_{12} = \underline{Z}_{10} \underline{I}_1 - \underline{Z}_{20} \underline{I}_2 \quad (2.52)$$

Тогда из сопоставления (2.51) и 2.52) следует

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{10} &= \underline{Z}_1 \underline{Z}_{\Delta}^{-1} \underline{Z}_3, \\ \underline{Z}_{20} &= \underline{Z}_1 \underline{Z}_{\Delta}^{-1} \underline{Z}_2. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Выразив далее из (2.49) вектор-столбцы токов \underline{I}_{12} и \underline{I}_{31} и подставив их в (2.48), найдем

$$\underline{I}_{23} = \underline{Z}_{\Delta}^{-1}(\underline{Z}_1 \underline{I}_2 - \underline{Z}_3 \underline{I}_3).$$

Далее учитывая соотношения для падения напряжения в ветви треугольника 2-3

$$\underline{U}_{23} = \underline{Z}_2 \underline{I}_{23} = \underline{Z}_2 \underline{Z}_{\Delta}^{-1} \underline{Z}_1 \underline{I}_2 - \underline{Z}_2 \underline{Z}_{\Delta}^{-1} \underline{Z}_3 \underline{I}_3, \quad (2.54)$$

а с другой стороны, то же самое напряжение между узлами 2 и 3 из схемы звезды (Рисунок 2.16)

$$\underline{U}_{23} = \underline{Z}_{20} \underline{I}_2 - \underline{Z}_{30} \underline{I}_3 \quad (2.55)$$

найдем путем сравнения выражений (2.54) и (2.55)

$$\underline{Z}_{30} = \underline{Z}_2 \underline{Z}_{\Delta}^{-1} \underline{Z}_3. \quad (2.56)$$

Окончательно имеем для преобразования треугольной схемы многополюсников в схему звезды следующие соотношения для поперечных элементов

$$\begin{aligned}
\underline{Y}_1 &= \underline{Y}_{11} + \underline{Y}_{31} = (\underline{D}_1 - 1_3) \underline{B}_1^{-1} + \underline{B}_3^{-1} (\underline{A}_3 - 1_3), \\
\underline{Y}_2 &= \underline{Y}_{22} + \underline{Y}_{12} = (\underline{D}_2 - 1_3) \underline{B}_2^{-1} + \underline{B}_1^{-1} (\underline{A}_1 - 1_3), \\
\underline{Y}_3 &= \underline{Y}_{33} + \underline{Y}_{23} = (\underline{D}_3 - 1_3) \underline{B}_3^{-1} + \underline{B}_2^{-1} (\underline{A}_2 - 1_3),
\end{aligned} \tag{2.57}$$

и соответственно для продольных матричных сопротивлений

$$\begin{aligned}
\underline{Z}_{10} &= \underline{B}_1 \underline{B}_\Delta^{-1} \underline{B}_3, \\
\underline{Z}_{20} &= \underline{B}_1 \underline{B}_\Delta^{-1} \underline{B}_2, \\
\underline{Z}_{30} &= \underline{B}_2 \underline{B}_\Delta^{-1} \underline{B}_3,
\end{aligned} \tag{2.58}$$

где $\underline{B}_\Delta = \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_3$.

Подобным образом можно преобразовать шестиполосники, соединенные по схеме звезды в треугольную схему.

ГЛАВА 3 АНАЛИЗ РЕЖИМОВ СЕТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ БАЙКАЛО-АМУРСКОЙ МАГИСТРАЛИ

3.1 Исследуемые показатели качества электроэнергии

К важнейшим показателям качества электрической энергии относятся отклонения напряжения и коэффициенты несимметрии.

Отклонения напряжений, возникающие в сети, согласно [33,71] определяются как

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

где U – напряжение в рассматриваемой точке сети; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

В том случае, когда в сети наблюдается несимметрия, под величиной U понимается напряжение прямой последовательности.

При анализе отклонений напряжения в характерных режимах и различных пунктах сети 220 кВ БАМ, исходя из практики эксплуатации этой сети, принимаются следующие условия:

– максимально допустимое напряжение в сети 220 кВ определяется наибольшим рабочим напряжением $U_{\text{МАХ}} = U_{\text{нр}} = 252$ кВ и соответствующее допустимое отклонение напряжения составляет $\delta U_{\text{допМАХ}} = 14,5\%$ (или фазное 145,6 кВ);

– минимально допустимое напряжение в сети 220 кВ определяется требованиями обеспечения необходимых запасов устойчивости нагрузки и примерно равно номинальному напряжению сети $U_{\text{МИН}} = U_{\text{ном}} = 220$ кВ, а соответствующее допустимое отклонение напряжения будет $\delta U_{\text{допМИН}} = 0\%$.

Возникающая в сети несимметрия в основном связана с обратной последовательностью. При этом нормально допустимые коэффициенты по

обратной последовательности, как это уже было отмечено выше, не должны превышать 2%, а предельно допустимое значение коэффициента несимметрии составляет 4% по ГОСТ 32144-2013

3.2 Матричный метод моделирования сети внешнего электроснабжения

3.2.1 Описание расчетной схемы

Особенности системы электроснабжения БАМ на уровне 2015 г. приведены на рисунке 3.1.

Средний межпоездной интервал принят равным 50 мин в соответствии со стратегией развития железных дорог и планами Восточно-Сибирской железной дороги. Для расчетов режимов использованы значения тяговых нагрузок зимнего рабочего дня 2015 г., полученные на основе имитационного моделирования [17,59,62]. В таблице 3.1 приведены параметры тяговой нагрузки, представленной в виде активных и реактивных проводимостей в различных узлах схемы

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{ia} &= G_{ia} + jB_{ia}, \\ \underline{Y}_{ib} &= G_{ib} + jB_{ib}, \\ \underline{Y}_{ic} &= G_{ic} + jB_{ic},\end{aligned}\tag{3.2}$$

где i – название узла.

Таблица 3.1 - Расчетные проводимости узлов тяговой нагрузки

Подстанция	Проводимость, мкСм					
	Фаза а		Фаза b		Фаза с	
	G_i	B_i	G_i	B_i	G_i	B_i
Коршуниха	2099	-1074	2099	-1074	2099	-1074
Лена	2386	-1157	2386	-1157	2386	-1157
Якурим	109,4	-74,9	755,3	-168,8	326,0	-683,5
Звездная	131,2	-175,4	279,9	-110,2	269,9	-279,5
Ния	282,4	-96,7	298,2	-169,4	236,1	-152,7
Киренга	257,3	-162,7	254,4	-149,9	254,8	-177,7
Улькан	402,41	-221,2	359,5	-171,5	457,6	-167,5
Кунерма	192,2	-170,1	201,3	-93,0	286,5	-146,6
Даван	68,3	-184,6	269,4	-134,3	229,4	-356,0
С/байкальск	766,2	-569,0	818,3	-554,1	914,2	-652,1
Кичера	66,3	-130,8	181,6	-91,0	140,2	-176,2
Ангоя	141,7	-190,1	94,8	-124,8	138,8	-57,8
Уоян	138,2	-86,7	232,6	-122,6	182,0	-223,2
Янчукан	129,6	-40,4	123,5	-164,5	-25,7	-124,3
Ангаракан	39,9	-77,4	54,5	16,7	98,3	-66,0
Перевал	47,1	-34,1	37,9	-13,4	34,9	-36,1
Окусикан	92,3	-72,9	243,5	-3,40	219,2	-201,6
Таксимо	678,3	-297,7	659,0	-305,9	693,5	-3,6

Помимо несимметричных нагрузок для тяговых подстанций, указанных в таблице 3.1, при расчете учтена стационарная симметричная нагрузка на подстанциях, указанных в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Стационарные нагрузки подстанций зимнего рабочего дня

Подстанция	Трехфазная		На фазу	
	P , МВт	Q , Мвар	P , МВт	Q , Мвар
Усть-Кут	20,1	12,0	6,7	4,0
Лена	81,0	42,0	27,0	14,0
Киренга	17,7	5,1	5,9	1,7
Северобайкальск	90,9	47,1	30,3	15,7
Таксимо 110	18,3	6,0	6,1	2,0
Мамакан	76,2	14,1	25,4	4,7
Куанда	20	15	6,7	5
Хани	20	15	6,7	5
Юктали	20	15	6,7	5
Лопча	20	15	6,7	5
Хорогочи	20	15	6,7	5
Тында	20	15	6,7	5

Расчетная схема охватывает систему электроснабжения от Усть-Илимской и Братской ГЭС до ПС Тында. В качестве балансирующих узлов приняты шины Усть-Илимской ГЭС, Братской ГЭС, ПС Тында. Обе цепи двухцепной ВЛ Таксимо – Мамаканская ГЭС предполагаются включенными на напряжение 220 кВ. Мамаканская ГЭС задана $U\delta$ узлом, при этом угол δ подбирается исходя из мощности ГЭС.

Участок сети от Таксимо до Тынды выполнен длинными линиями, при этом на некоторых из них нет транспозиции. Эти линии являются источниками несимметрии, поэтому на данном участке учтена фактическая конструкция линий 220 кВ (Рисунок 3.2).

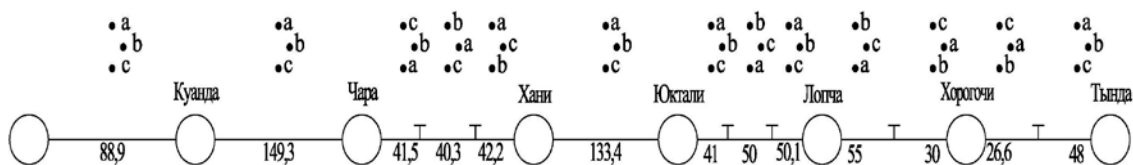


Рисунок 3.2 – Схема расположения фаз на восточном участке БАМ.

3.2.2 Алгоритм расчёта режима

Алгоритм расчёта режима, основанный на линейзации тяговой нагрузки, представляет вторую часть методики анализа несимметрии в протяженной трёхфазной сети, питающей тяговую нагрузку. Разработанный алгоритм включает следующие шаги.

1-ый шаг. На этом шаге осуществляется эквивалентирование двухцепных участков к одноцепным, как это предлагается в главе 2, и приведение схемы к каскадно соединённым трёхфазным элементам между эквивалентной ЭДС и точкой раздела (рисунок 3.3).

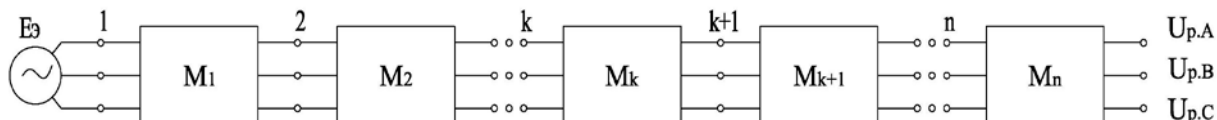


Рисунок 3.3 – Схема каскадно соединённых трёхфазных элементов

2-ой шаг. На этом шаге сначала схема каскадно соединённых трёхфазных элементов приводится к эквивалентной схеме, показанной на рисунке 3.4.

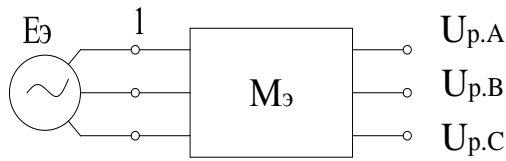


Рисунок 3.4 – Эквивалентная схема

Матрица коэффициентов эквивалентной схемы соответственно находится как

$$\underline{M}_{\text{э}} = \begin{vmatrix} \underline{A}_{\text{э}} & \underline{B}_{\text{э}} \\ \underline{C}_{\text{э}} & \underline{D}_{\text{э}} \end{vmatrix} = \prod_{k=1}^N \underline{M}_k \quad (3.3)$$

где $\underline{M}_k = \begin{vmatrix} \underline{A}_k & \underline{B}_k \\ \underline{C}_k & \underline{D}_k \end{vmatrix}$ – матрица коэффициентов k -го элемента.

Далее определяется напряжение в точке раздела

$$\underline{U}_{\text{рф}} = \underline{A}_{\text{э}}^{-1} \underline{E}_{\text{э}}, \quad (3.4)$$

где $\underline{E}_{\text{э}} = \begin{vmatrix} \underline{E}_{\text{эa}} \\ \underline{E}_{\text{эb}} \\ \underline{E}_{\text{эc}} \end{vmatrix}$ – вектор-столбец эквивалентных фазных ЭДС;

$\underline{U}_{\text{рф}} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{\text{pa}} \\ \underline{U}_{\text{pb}} \\ \underline{U}_{\text{pc}} \end{vmatrix}$ – вектор-столбец фазных напряжений в точке раздела.

3-ий шаг. На этом шаге находятся напряжения в узловых точках схемы, изображённой на рисунке 3.3. Для этого используются следующие соотношения

$$\underline{U}_{\text{kф}} = \underline{A}_{\text{кр}} \underline{U}_{\text{рф}} = \underline{A}_{\text{кр}} \underline{A}_{\text{э}}^{-1} \underline{E}_{\text{э}} \quad (3.5)$$

где $k = \overline{1, N}$;

$\underline{M}_{\text{кр}} = \begin{vmatrix} \underline{A}_{\text{кр}} & \underline{B}_{\text{кр}} \\ \underline{C}_{\text{кр}} & \underline{D}_{\text{кр}} \end{vmatrix} = \prod_{v=k}^N \underline{M}_v$ – матрица коэффициентов на участке $k - p$;

$\underline{M}_v = \begin{vmatrix} \underline{A}_v & \underline{B}_v \\ \underline{C}_v & \underline{D}_v \end{vmatrix}$ – матрица коэффициентов v -го элемента.

4-ый шаг. На этом этапе определяются напряжения в промежуточных пунктах двухцепных участков схемы. Для решения этой задачи воспользуемся расчётной схемой, показанной на рисунке 3.5.

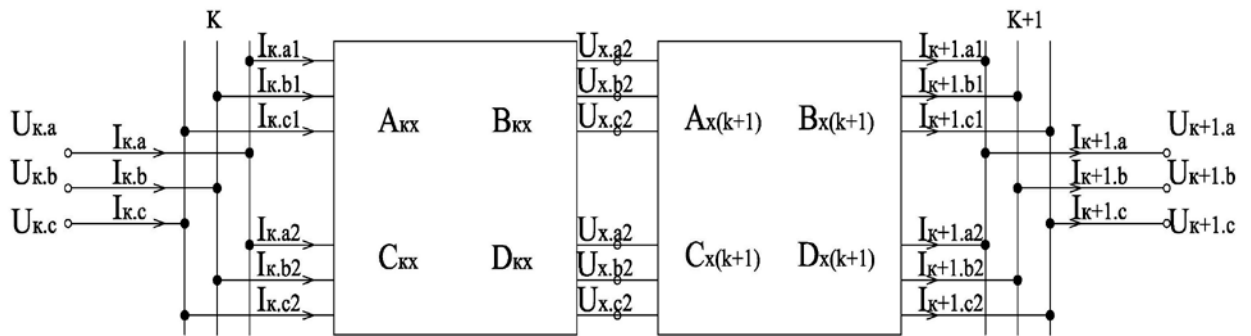


Рисунок 3.5 – Схема для расчёта напряжений в промежуточном пункте двухцепного участка

Напряжение в промежуточном пункте через режимные параметры приёмного конца найдётся

$$\underline{U}_x = \underline{A}_{x(k+1)} \underline{U}_{k+1} + \underline{B}_{x(k+1)} \underline{I}_{k+1} \quad (3.6)$$

где $\underline{U}_{k+1} = \begin{vmatrix} \underline{U}_{x+1.a} \\ \underline{U}_{x+1.b} \\ \underline{U}_{x+1.c} \\ \underline{U}_{x+1.a} \\ \underline{U}_{x+1.b} \\ \underline{U}_{k+1.c} \end{vmatrix}$, $\underline{I}_{k+1} = \begin{vmatrix} \underline{I}_{x+1.a1} \\ \underline{I}_{x+1.b1} \\ \underline{I}_{x+1.c1} \\ \underline{I}_{x+1.a2} \\ \underline{I}_{x+1.b2} \\ \underline{I}_{x+1.c2} \end{vmatrix}$ – вектор-столбцы фазных напряжений и токов

на приёмном конце двухцепного участка;

$$\underline{U}_x = \begin{pmatrix} \underline{U}_{x.a1} \\ \underline{U}_{x.b1} \\ \underline{U}_{x.c1} \\ \underline{U}_{x.a2} \\ \underline{U}_{x.b2} \\ \underline{U}_{x.c2} \end{pmatrix} - \text{вектор-столбцы искоемых фазных напряжений.}$$

Выразим вектор-столбец токов на приёмном конце через напряжения по концам участка. Учитывая, что

$$\underline{U}_k = \underline{A}_x \underline{U}_{k+1} + \underline{B}_x \underline{I}_{k+1},$$

$$\text{где } \underline{M}_k = \begin{pmatrix} \underline{A}_k & \underline{B}_k \\ \underline{C}_k & \underline{D}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \underline{A}_{kx} & \underline{B}_{kx} \\ \underline{C}_{kx} & \underline{D}_{kx} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{A}_{x(k+1)} & \underline{B}_{x(k+1)} \\ \underline{C}_{x(k+1)} & \underline{D}_{x(k+1)} \end{pmatrix} - \text{матрица коэффициентов } k\text{-го}$$

двухцепного участка, найдём

$$\underline{I}_{k+1} = \underline{B}_k^{-1} (\underline{U}_k - \underline{A}_x \underline{U}_{k+1}).$$

После подстановки последнего соотношения в (3.6) получим

$$\underline{U}_x = \underline{B}_{x(k+1)} \underline{B}_k^{-1} \underline{U}_k + (\underline{A}_{x(k+1)} - \underline{B}_{x(k+1)} \underline{B}_k^{-1} \underline{A}_k) \underline{U}_{k+1}. \quad (3.7)$$

Можно убедиться, что имеет место тождество

$$(\underline{A}_{x(k+1)} - \underline{B}_{x(k+1)} \underline{B}_k^{-1} \underline{A}_k) \underline{B}_k = \underline{B}_{kx}. \quad (3.8)$$

В результате из (3.7) получаем простое и компактное выражение, определяющее напряжение в промежуточных точках двухцепного участка через напряжения в концевых узлах и матричные коэффициенты \underline{B} соответствующих частей двухцепного участка

$$\underline{U}_x = \underline{B}_{x(k+1)} \underline{B}_k^{-1} \underline{U}_k + \underline{B}_{kx} \underline{B}_k^{-1} \underline{U}_{k+1}. \quad (3.9)$$

Соответственно напряжение на каждой из цепей найдётся из

$$\underline{U}_x = \begin{pmatrix} \underline{U}_{x.1} \\ \underline{U}_{x.2} \end{pmatrix}, \quad (3.10)$$

$$\text{где } \underline{U}_{x.1} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{x.a1} \\ \underline{U}_{x.b1} \\ \underline{U}_{x.c1} \end{pmatrix}, \quad \underline{U}_{x.2} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{x.a2} \\ \underline{U}_{x.b2} \\ \underline{U}_{x.c2} \end{pmatrix} - \text{вектор-столбцы искоемых фазных напряжений}$$

в промежуточном пункте соответственно для 1-ой и 2-ой цепей двухцепного

участка.

5-ый шаг. На этом шаге определяются отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии на узловых и промежуточных подстанциях СВЭ. По рассчитанным фазным напряжениям находятся симметричные составляющие напряжений согласно

$$\underline{U}_{\text{расч.сим}} = \underline{S}_{\text{сим}}^{-1} \underline{U}_{\text{расч.ф}}, \quad (3.11)$$

$$\underline{U}_{\text{расч.ф}} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{\text{расч.а}} \\ \underline{U}_{\text{расч.б}} \\ \underline{U}_{\text{расч.с}} \end{pmatrix} - \text{вектор-столбец искоемых фазных напряжений в}$$

расчётном пункте сети;

$$\underline{U}_{\text{расч.сим}} = \begin{pmatrix} \underline{U}_{\text{расч.пр}} \\ \underline{U}_{\text{расч.об}} \\ \underline{U}_{\text{расч.0}} \end{pmatrix} - \text{симметричные составляющие напряжений в}$$

расчётном пункте сети.

Определив симметричные составляющие напряжений, находим далее отклонение напряжений и коэффициенты несимметрии по обратной последовательности согласно выражениям (1.1, 3.1).

3.3 Анализ отклонения напряжений и несимметрия в сети внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали

3.3.1 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Таксимо

Результаты расчета отклонений напряжений и несимметрии при движении поездов с интервалами 50 мин при отсутствии средств симметрирования для западной части БАМ приведены в таблице 3.3 и на рисунках 3.6, 3.7, для восточной части - в таблице 3.4 и на рисунках 3.8,3.9.

Таблица 3.3 - Отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %	$dU1$, %
УИГЭС	0	11,8
Рудногорск	0,41	5,79
Коршуниха	0,72	2,57
Усть-Кут	1,37	-1,15
Лена	1,48	-1,8
Якурим	1,88	-2,87
Звездная	1,98	-4,2
Ния	2,29	-5,6
Киренга	2,63	-8,12
Улькан	2,84	-9,35
Кунерма	3,06	-10,34
Дабан	3,33	-11,21
С/байкальск	3,38	-11,83
Кичера	3,58	-11,03
Ангоя	3,5	-10,39
Уоян	3,67	-9,79
Янчукан	3,6	-9,37
Ангаракан	3,84	-9,3
Перевал	3,58	-9,18
Окусикан	3,86	-9,31
Таксимо	3,52	-9,44

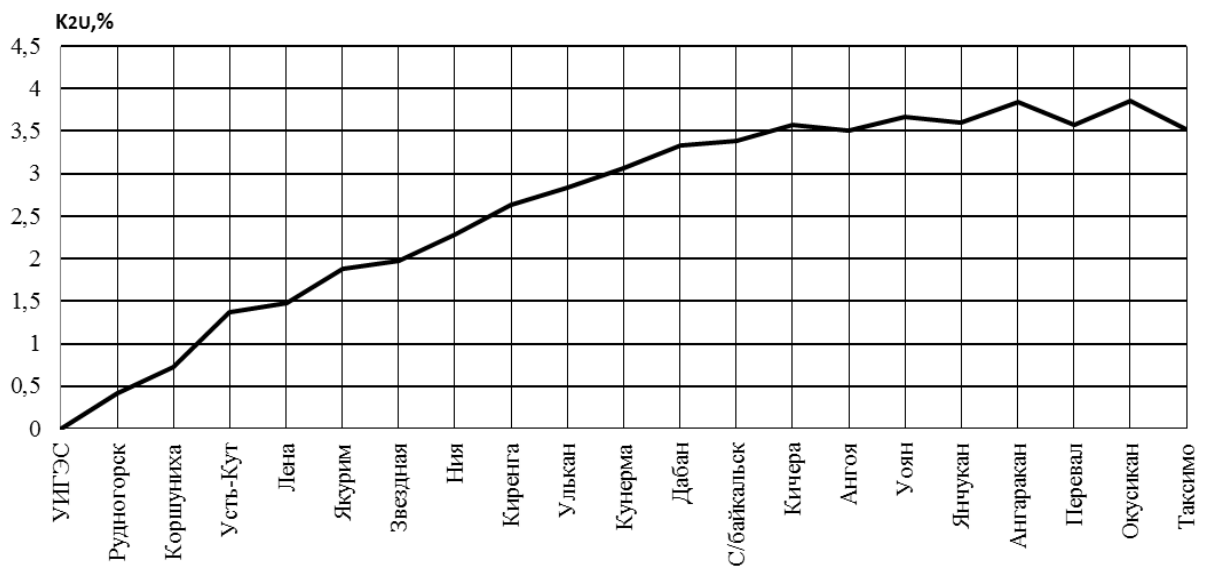


Рисунок 3.6 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

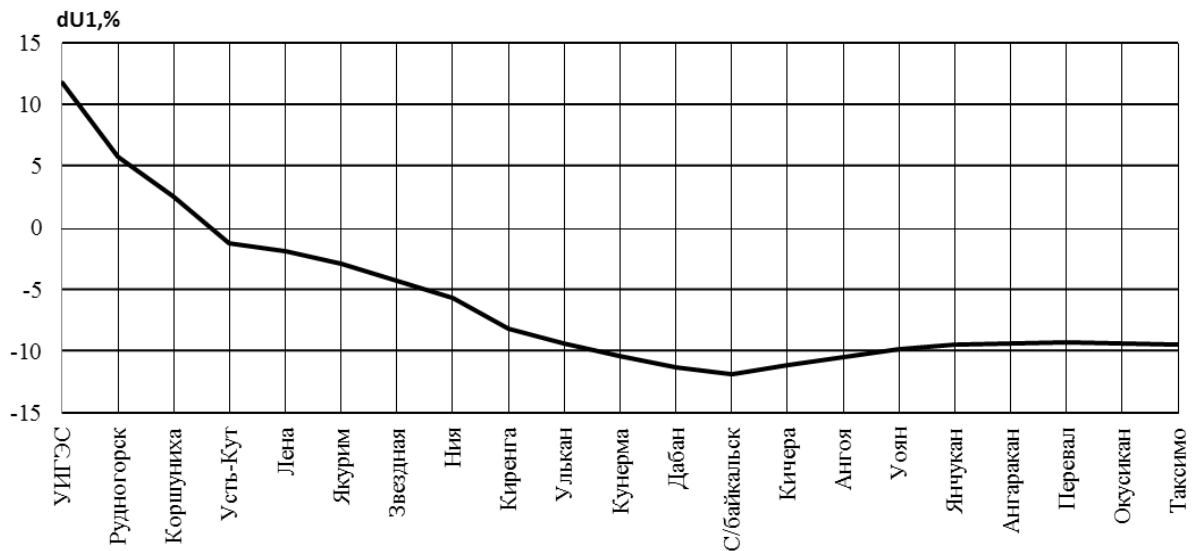


Рисунок 3.7 – Отклонения напряжений

Несимметрия на большей части западного участка БАМ, начиная от ПС Звездная, превышает нормально допустимые значения. Отклонения напряжений в сторону снижения от номинального значения, присутствуют начиная с подстанций восточнее ПС Лена.

Несимметрия на большей части восточного участка БАМ превышает нормально допустимые значения. Отклонения напряжений достигают – 4% .

Таблица 3.4 - Отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %	$dU1$, %
Таксимо	3,47	0
Куанда	3,48	-1,31
Чара	3,4	-1,94
Хани	3,09	-3,88
Юктали	2,89	-4,25
Лопча	2,01	-3,4
Хорогочи	1,27	-1,43
Тында	0,49	2,26

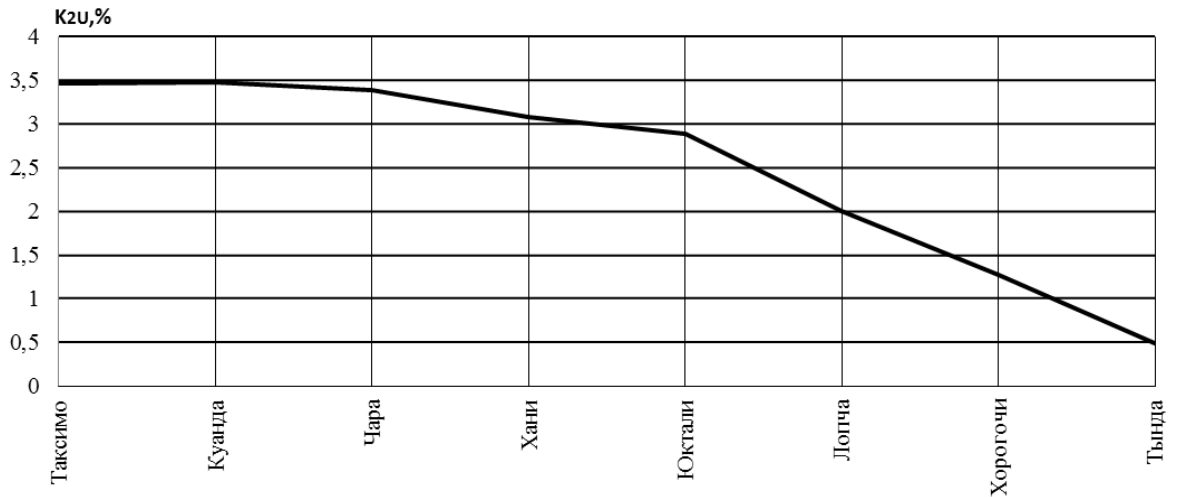


Рисунок 3.8 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

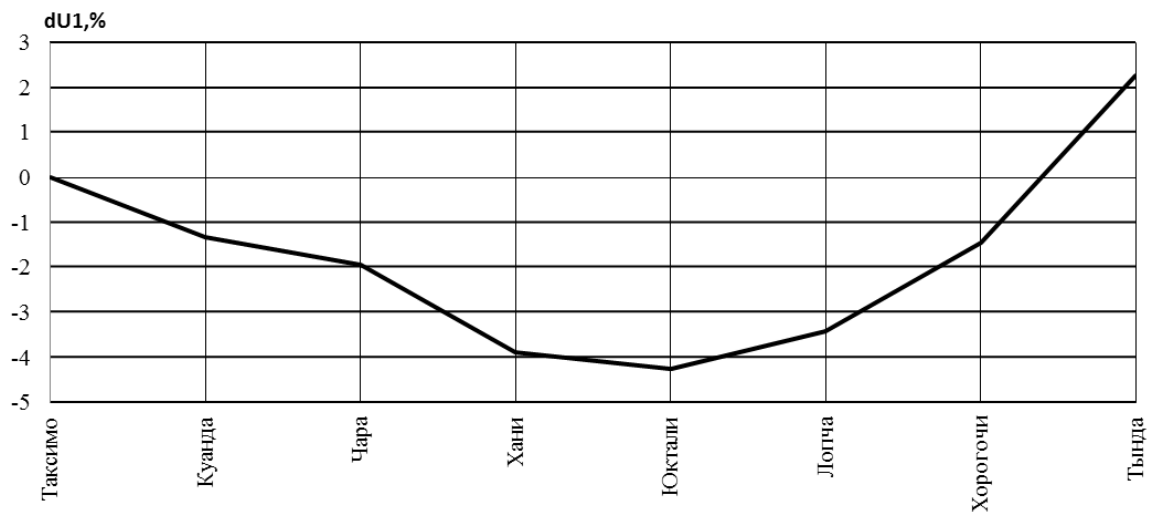


Рисунок 3.9 – Отклонения напряжений

Полученные значения отклонений напряжений и коэффициента несимметрии для западной и восточной части СВЭ БАМ диктуют необходимость использования устройств компенсации реактивной мощности для повышения уровней напряжений и симметрирующих устройств для устранения недопустимой несимметрии.

В таблице 3.5 приведены расчетные значения генерации в сети БАМ для западной и восточной части при разделе на ПС Таксимо.

Таблица 3.5 - Генерации участка на 2015 г. (ЗРД), раздел ПС Таксимо

Подстанция	Генерация, МВт	На фазу, МВт	Напряжение, кВ
Усть-Кут	377	126	124 (215)
ММГЭС	8,2	2,7	129 (223)
ПС 220 кВ Тында	105,2	35,1	133 (230)

3.3.2 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Уоян

Результаты расчета отклонений напряжений и несимметрии при движении поездов с интервалами 50 мин при отсутствии средств симметрирования для западной части БАМ приведены в таблице 3.6 и на рисунках 3.10, 3.11, для восточной части – в таблице 3.7 и на рисунках 3.12, 3.13.

Таблица 3.6 - Отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %	$dU1$, %
УИГЭС	0	10,2
Рудногорск	0,41	6,98
Коршуниха	0,71	3,97
Усть-Кут	1,35	0,6
Лена	1,46	-0,03
Якурим	1,84	-1,05
Звездная	1,94	-2,32
Ния	2,24	-3,72
Киренга	2,54	-6,34
Улькан	2,74	-7,71
Кунерма	2,95	-8,91
Дабан	3,21	-9,97
С/байкальск	3,25	-10,84
Кичера	3,42	-10,55
Ангоя	3,32	-10,39
Уоян	3,46	-10,36

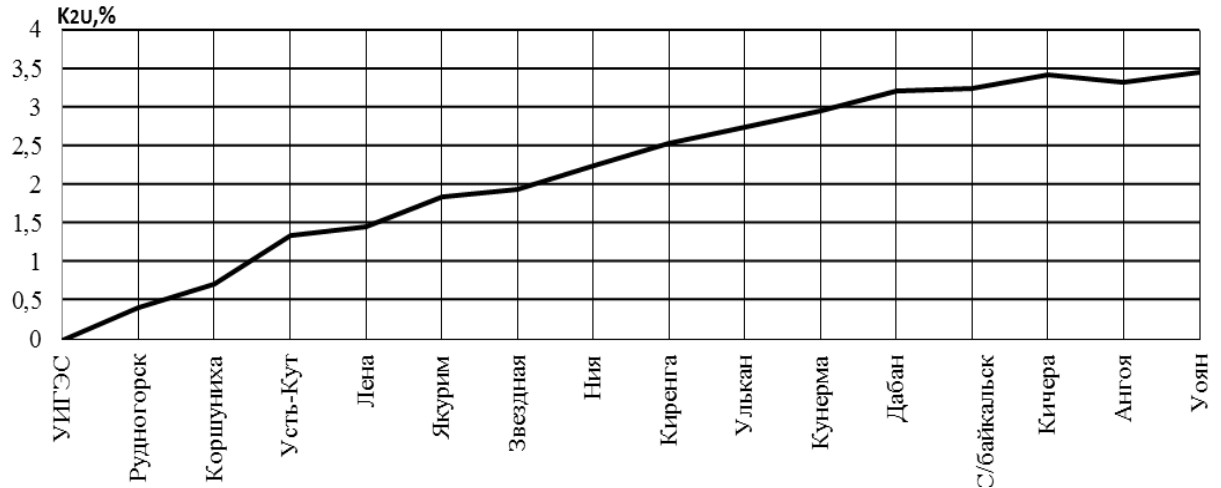


Рисунок 3.10 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

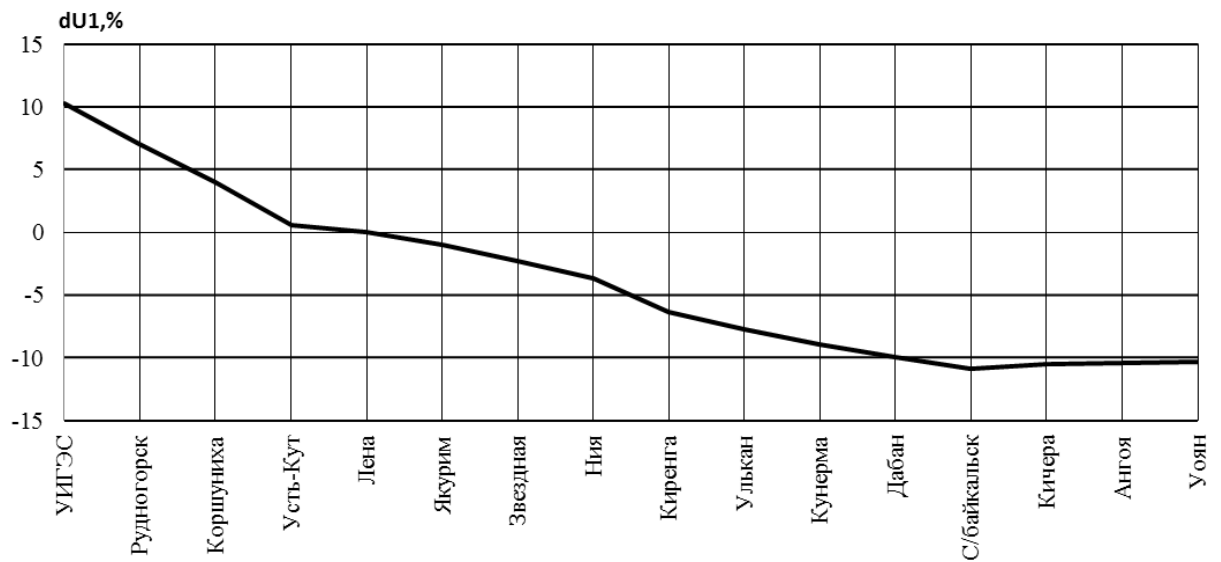


Рисунок 3.11. – Отклонения напряжений

Несимметрия на большей части западного участка БАМ (от ПС Звездная до ПС Уоян) превышает нормально допустимые значения. Отклонения напряжений достигают на ряде подстанций –10%.

Таблица 3.7 - Отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %	$dU1$, %
Уоян	4,69	9,78
Янчукан	4,7	9,7
Ангаракан	4,47	9,6
Перевал	4,55	9,56
Окусикан	4,43	9,27
Таксимо	4,24	8,4
Куанда	4,08	5,56
Чара	3,92	3,3
Хани	3,42	-2,03
Юктали	3,12	-4,07
Лопча	2,04	-6,54
Хорогочи	1,22	-4,76
Тында	0,42	1,09

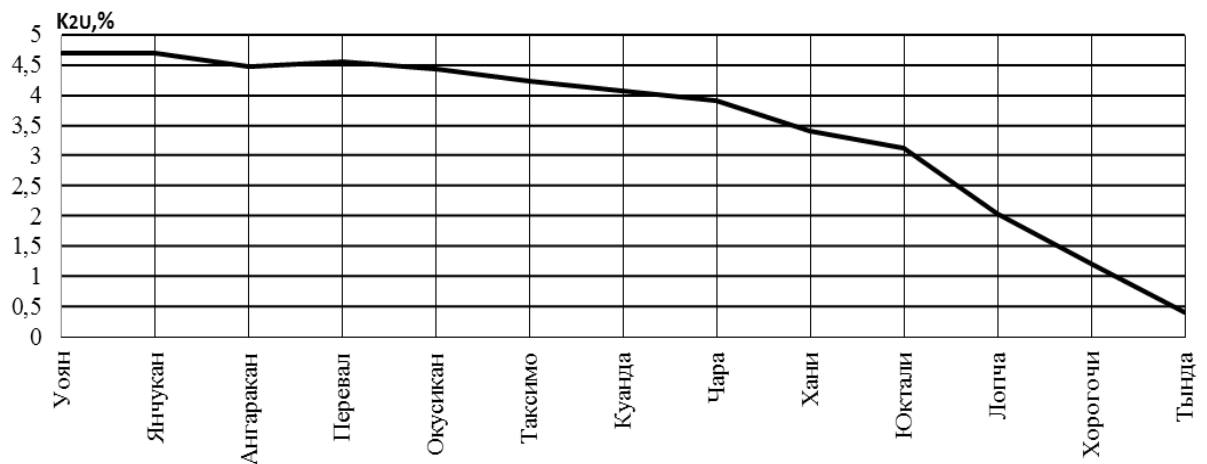


Рисунок 3.12. – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

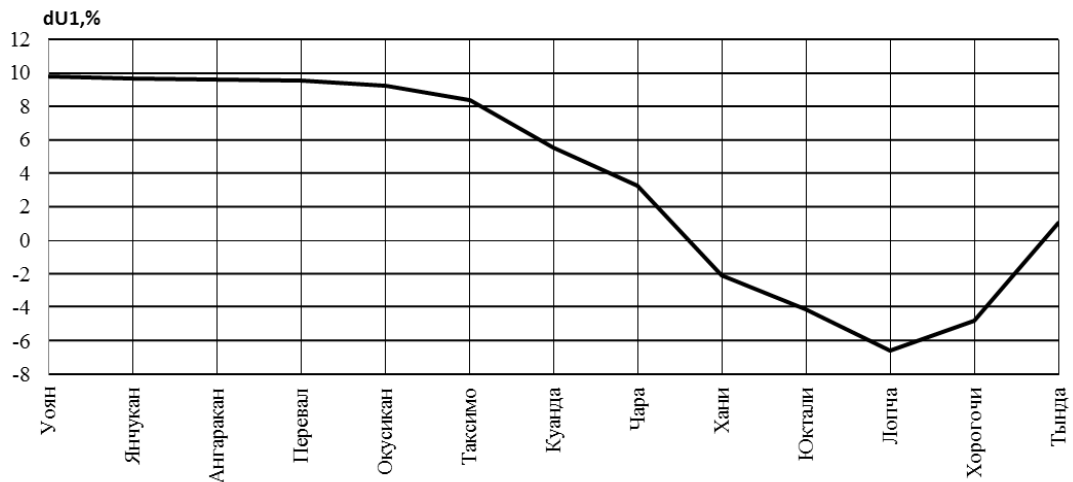


Рисунок 3.13 – Отклонения напряжений

Несимметрия на большей части восточного участка БАМ превышает нормально-допустимые значения, а на ряде подстанций и предельно допустимые значения, велик и размах отклонений напряжений, достигающий +9,8 и –6,6 % .

В таблице 3.8 приведены расчетные значения генерации в сети БАМ.

Таблица 3.8 - Генерации региона на 2015 г. (ЗРД)

Подстанция	Генерация, МВт	На фазу, МВт	Напряжение, кВ
Усть-Кут	338	113	129 (223)
ММГЭС	4,27	1,4	138(239)
ПС Тында	167	55,7	133 (230)

3.3.3 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Северобайкальск

Результаты расчета отклонений напряжений и несимметрии при движении поездов с интервалами 50 мин при отсутствии средств симметрирования для западной части БАМ приведены в таблице 3.9 и на рисунках 3.14, 3.15, для восточной части – в таблице 3.10 и на рисунках 3.16, 3.17.

Таблица 3.9 - Отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %	$dU1$, %
УИГЭС	0	8
Рудногорск	0,39	7,8
Коршуниха	0,68	5,29
Лена	1,29	2,88
Усть-Кут	1,39	2,35
Якурим	1,75	1,75
Звездная	1,82	1,35
Ния	2,08	0,48
Киренга	2,31	-0,78
Улькан	2,47	-1,54
Кунерма	2,62	-2,03
Дабан	2,82	-2,67
С/байкальск	2,81	-3,03

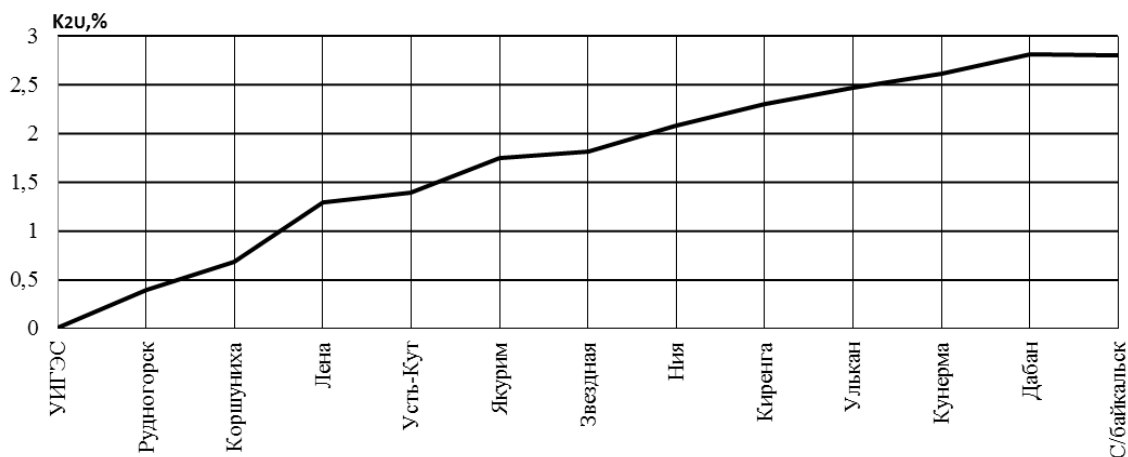


Рисунок 3.14 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

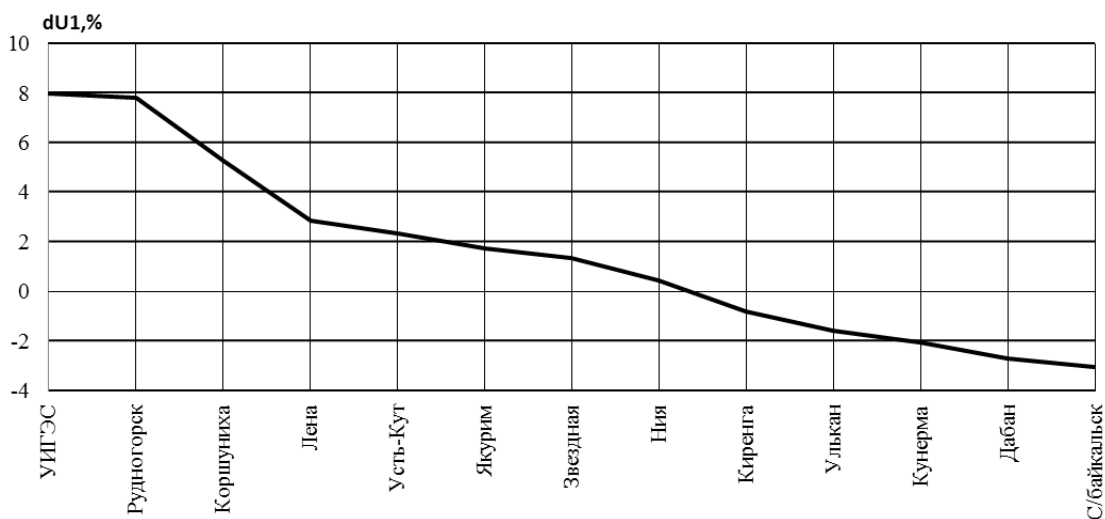


Рисунок 3.15 – Отклонения напряжений

Несимметрия на значительной части западного участка БАМ (восточнее ПС Ния) превышает нормально допустимые значения. Отклонения напряжений достигают -3% .

Таблица 3.10 - Отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}, \%$	$dU, \%$
С/байкальск	5,36	-9,29
Кичера	5,39	-8,62
Ангоя	5,2	-8,12
Уоян	5,26	-7,72
Янчукан	5,2	-7,56
Ангаракан	5,08	-7,56
Перевал	5,03	-7,51
Окусикан	5,02	-7,69
Таксимо	4,69	-8,05
Куанда	4,47	-9,74
Чара	4,25	-10,84
Хани	3,46	-12,75
Юктали	3,08	-12,65
Лопча	1,9	-8,57
Хорогочи	1,12	-2,84
Тында	0,42	5,82

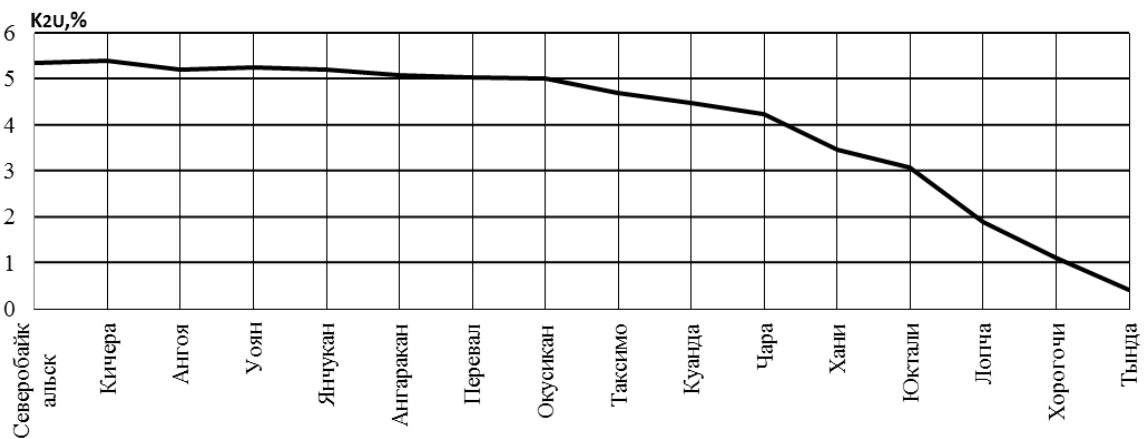


Рисунок 3.16 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

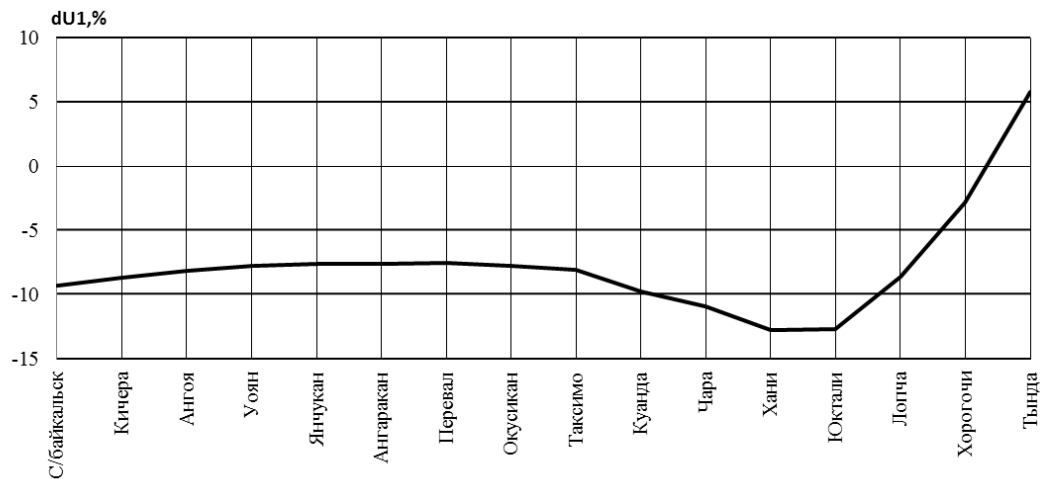


Рисунок 3.17 – Отклонения напряжений

Несимметрия на большей части восточного участка БАМ превышает предельно допустимые значения, а на подстанциях западнее ПС Чара превышены предельно допустимые значения коэффициента несимметрии напряжения 4%. Отклонения напряжений 13 % .

Полученные значения параметров качества электроэнергии говорят о необходимости использования устройств компенсации реактивной мощности для регулирования уровня напряжений и симметрирующих устройств для устранения несимметрии.

3.4 Общие результаты по главе

В таблице 3.11 приведены максимальные значения коэффициентов несимметрии и отклонений напряжения в различных режимах работы СВЭ БАМ. Согласно таблице 3.11 наиболее неблагоприятными режимами являются режимы работы сети при разделах на ПС Таксимо и ПС Северобайкальск. При разделе на ПС Таксимо в западной части СВЭ наблюдаются наибольшие для этого участка коэффициенты несимметрии напряжения и отклонения напряжений. При разделе системы на ПС Северобайкальск имеют место максимальные коэффициенты несимметрии и отклонений напряжения в Восточной части БАМ.

Таблица 3.11 - Сводная таблица показателей качества электроэнергии СВЭ
БАМ без применения СКРМ и СУ

Расчетный параметр		Раздел на ПС Таксимо	Раздел на ПС Уоян	Раздел на ПС С/байкальск
Максимальный коэффициент несимметрии, %	Зап. часть	3,9 (Окусикан)	3,5 (Уоян)	2,8 (Дабан)
	Вост. часть	3,5 (Куанда)	4,7 (Янчукан)	5,4 (Кичера)
Максимальное отклонение напряжения, %	Зап. часть	-11,8 (С/байкальск)	-10,8 (С/байкальск)	-3,0 (С/байкальск)
	Вост. часть	-4,25 (Юктали)	-6,5 (Лопча)	-12,75 (Хани)

Таким образом в каждом из вышерассмотренных режимов одностороннего питания сети БАМ требуется применение устройств компенсации реактивной мощности и симметрирующих устройств.

ГЛАВА 4 РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

4.1 Типы компенсирующих устройств и основные положения по выбору их параметров.

На рисунке 4.1 перечислены основные типы компенсирующих устройств (КУ) шунтирующего типа.

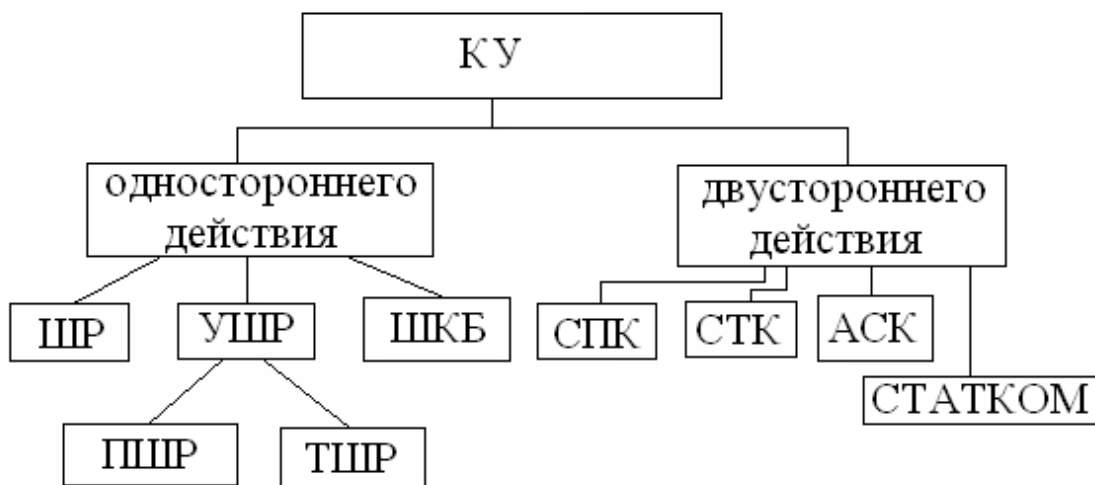


Рисунок 4.1 – Типы компенсирующих устройств

КУ подразделяются на устройства одностороннего и двустороннего действия. КУ *одностороннего* действия могут только потреблять или только генерировать реактивную мощность. К этим устройствам относятся:

- шунтирующие реакторы (ШР), повсеместно применяемые для компенсации зарядной мощности линий;
- управляемые шунтирующие реакторы (УШР), внедрение которых начато в последние годы, и которые, в свою очередь, подразделяются на подмагничиваемые ШР (ПШР) и тиристорные ШР (ТШР);
- шунтовые конденсаторные батареи (ШКБ).

КУ *двустороннего* действия могут работать как в режиме генерации реактивной мощности, так и ее потребления. Эти устройства обычно называются компенсаторами, и они подразделяются на следующие виды:

- статические подмагничиваемые компенсаторы (СПК);
- статические тиристорные компенсаторы (СТК);
- статические компенсаторы (СТАТКОМ);
- синхронные компенсаторы (СК), в том числе асинхронизированные компенсаторы (АСК) с поперечной обмоткой на роторе.

Шунтирующие реакторы для ВЛ 220 кВ и ниже изготавливаются в трёхфазном исполнении, а для ВЛ 500 кВ и выше однофазном исполнении [45]. ШР компенсирует емкостную проводимость линии и тем самым выполняют две функции: компенсирует зарядную мощность линии и ограничивает внутренние перенапряжения. С целью обеспечения баланса реактивной мощности при изменении передаваемой активной мощности по линии шунтирующие реакторы необходимо коммутировать с помощью выключателей. Таким путем может быть обеспечена весьма грубая ступенчатая регулировка реактивной мощности на зажимах линии.

Управляемые шунтирующие реакторы, как было сказано выше, подразделяются на подмагничиваемые и тиристорные реакторы [72-75]. Подмагничиваемые ШР (ПШР) представляют высоковольтную ферромагнитную катушку с изменяющимся в широких пределах индуктивным сопротивлением. Изменение индуктивности ПШР достигается путем насыщения магнитной системы. Степень насыщения регулируется за счет величины выпрямленного тока в обмотке управления. В результате достигается плавное регулирование потребляемой мощности от нуля до номинального значения. В силу инерционности контура управления УШР по быстродействию уступают УШР тиристорного типа.

Тиристорные ШР обладают почти безынерционной управляемостью. Управляющим элементом ТШР является тиристорный блок, который обеспечивает плавное регулирование тока через реактор (Рисунок 4.2). Для

линий ВН и СВН непосредственное подключение к ним тиристорных блоков (Рисунок 4.2а) связано с необходимостью последовательного включения большого числа тиристорных блоков. Такие тиристорные блоки, как правило, дороги. Поэтому обычно применяется подключение реакторов к обмотке низшего напряжения трансформатора (Рисунок 4.2б). При низком напряжении количество последовательно соединенных тиристорных блоков мало.

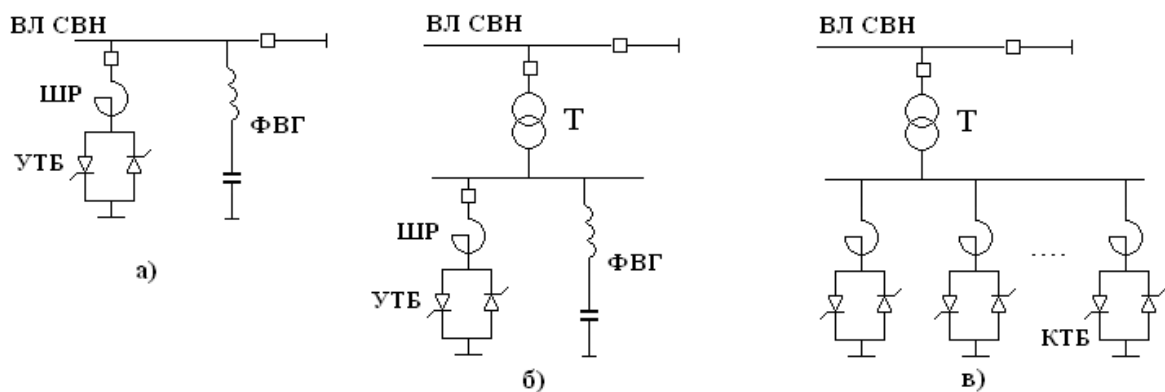


Рисунок 4.2 – Варианты ТШР: а – тиристорно-управляемый реактор с непосредственным подключением к линии; б – тиристорно-управляемый реактор, подключенный к линии через трансформатор; в – тиристорно - коммутируемый комплект реакторов со ступенчатым управлением реактивной мощностью.

Система их управления простая. Стоимость тиристорных блоков значительно меньше, чем для тиристорных блоков той же мощности на стороне ВН и СВН. Управляемые тиристорные блоки (УТБ) путем изменения угла открытия изменяют форму кривой тока, что приводит к появлению высших гармонических составляющих. Эти гармоники трансформируются в сеть за исключением третьей гармоники и кратных ей, поскольку обмотка низшего напряжения трансформатора соединяется в треугольник. Поэтому при установке ШР с УТБ необходимо оснащение их фильтрами высших гармоник.

Однако возможны схемы и без фильтров высших гармоник, если использовать параллельное соединение нескольких тиристорно-реакторных групп (рисунок 4.2в) с тиристорно-коммутируемыми блоками, т.е. тиристорами, которые работают только в режимах полного открытия и полного закрытия. Такая схема обеспечивает безынерционное ступенчатое управление, которое тем ближе к плавному регулированию, чем меньше мощность отдельной ступени.

ТШР трансформаторного типа представляет трансформатор, обмотка СВН (сетевая) которого подключается к линии, а обмотка низкого напряжения (управляющая) замкнута на тиристорный блок, осуществляющий плавное управление потребляемой реактивной мощностью (Рисунок 4.3). При полностью запертых тиристорах по сетевой обмотке протекает малый ток.

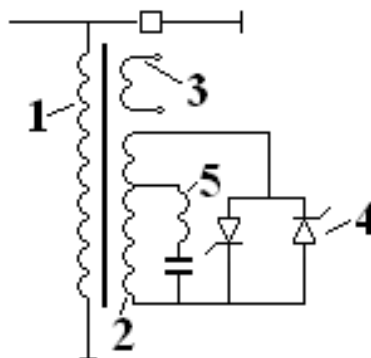


Рисунок 4.3 – Схема ТШР трансформаторного типа: 1 – сетевая обмотка; 2 – обмотка управления; 3 – компенсационная обмотка; 4 – тиристорный блок; 5 – фильтры высших гармоник.

При полностью открытых тиристорах обмотка управления замкнута накоротко, и по сетевой обмотке протекает номинальный ток [47]. При некотором угле открытия тиристоров в сетевой обмотке имеет место промежуточное значение тока. Непосредственная индуктивная связь обмотки управления с сетевой обмоткой приводит к передаче высших гармоник в кривой тока обмотки управления в сеть, за исключением третьей гармоники

и кратных ей, поскольку фазы реактора имеют компенсационные обмотки, соединенные в треугольник. Поэтому при установке УШРТ необходимо оснащение их фильтрами высших гармоник.

Шунтовые конденсаторные батареи (ШКБ) используются для генерации реактивной мощности. Конденсаторные батареи комплектуются на напряжение не более 110-220 кВ из отдельных конденсаторов, а установленная мощность конденсаторной установки находится в пределах 100 Мвар. Для применения на линиях СВН требуются трансформаторы для подключения нескольких конденсаторных установок. Подключение и отключение конденсаторных батарей осуществляется ступенями с помощью выключателей или тиристорных блоков.

Статический подмагничиваемый компенсатор (СПК) представляет совокупность подмагничиваемого ШР и шунтовой КБ, элементы которой коммутируются выключателями.

Статический тиристорный компенсатор (СТК) включает в свой состав тиристорный ШР на базе управляемого тиристорного блока и шунтовую КБ, элементы которой коммутируются тиристорами, как показано на рисунке 4.4 [50-52].

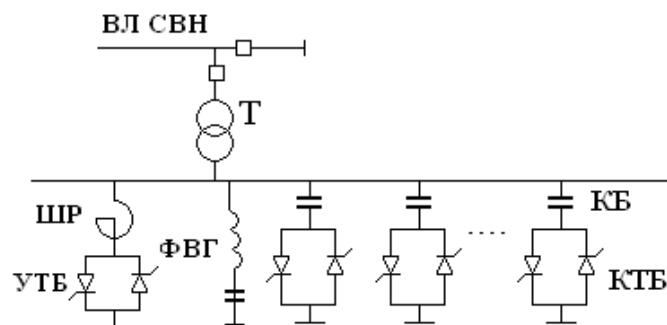


Рисунок 4.4 – Статический тиристорный компенсатор

Синхронный компенсатор (СК) представляет синхронную машину со свободно вращающимся ротором, т.е. без приложения механического момента на его валу. Управление реактивной мощностью СК осуществляется за счет изменения тока возбуждения с помощью автоматических регуляторов

возбуждения сильного действия (АРВ СД). В режиме генерации СК может выдавать его полную номинальную мощность, а в режиме потребления порядка 40% номинальной мощности. Улучшенными характеристиками обладают разработанные в настоящее время асинхронизированные компенсаторы с поперечной обмоткой на роторе, которые позволяют, как выдавать, так и потреблять полную номинальную мощность.

Статический компенсатор (СТАТКОМ). Как было отмечено выше, СТК генерирует или потребляет реактивную мощность, представляя при этом переменную реактивную проводимость. Возможность генерации регулируемой реактивной мощности непосредственно без использования ШКБ и ШР с помощью преобразователей напряжения была обнаружена в 1976 году [76,77]. Это стало возможным благодаря появлению запираемых тиристоров и других мощных полупроводников с внутренней запираемой способностью, которые используются в преобразователях напряжения.

Основное отличие преобразователей напряжения от традиционных преобразователей тока состоит в том, что в преобразователях тока применяются тиристоры с регулированием задержки на отпирание, и их запираение происходит только при переходе тока через нуль, а в преобразователях напряжения используются запираемые тиристоры, которые могут управлять процессом отключения тока независимо от его величины. Нормальная функция преобразователя состоит в преобразовании мощности постоянного тока в мощность переменного тока [78, 79]. Преобразователь состоит из многих полупроводниковых элементов, которые связывают вход с выходом (Рисунок 4.5а). Концы входа и выхода должны быть взаимно дополняемы. Если вход заканчивается источником напряжения (заряженный конденсатор), то выход должен заканчиваться источником тока (на практике это означает источник напряжения с индуктивным сопротивлением) и наоборот.

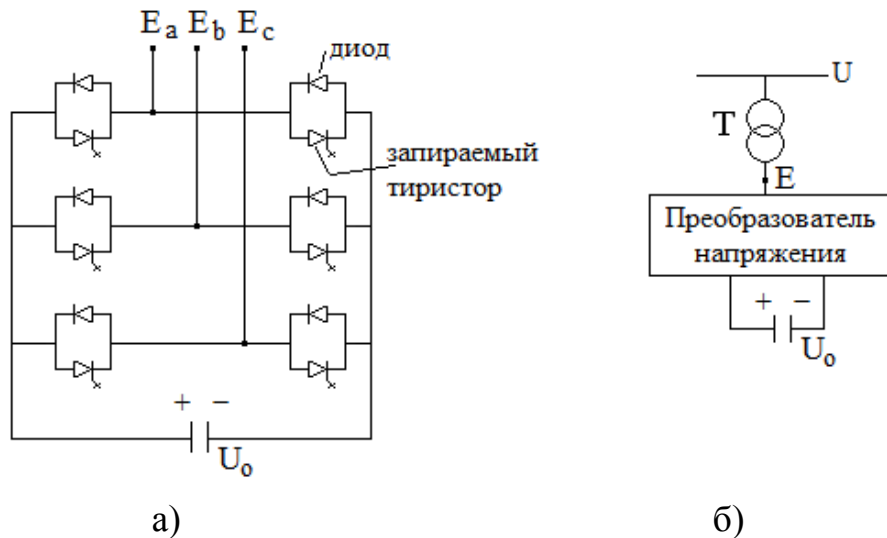


Рисунок 4.5 – Принципиальная схема СТАТКОМ: а – трёхфазный двухполупериодный преобразователь напряжения; б – схема СТАТКОМ

Преобразователи напряжения производят реактивную мощность без ШКБ и ШР за счёт циркуляции переменного тока по фазам. С точки зрения генерации реактивной мощности их работа подобна действию идеальной синхронной машины, где реактивная мощность изменяется за счёт управления возбуждением. Из-за их схожести с вращающимся синхронным компенсатором это устройство называется статическим синхронным компенсатором (СТАТКОМ).

Принципиальная схема СТАТКОМ показана на рисунке 4.5б. Напряжение источника постоянного тока, обеспечиваемого заряженным конденсатором, преобразуется в трёхфазное напряжение промышленной частоты на выходе.

Величина выходного напряжения прямо пропорциональна напряжению на конденсаторе. Изменением величины выходного напряжения может регулироваться обмен реактивной мощностью между преобразователем и системой подобно тому, как это делается в СК.

При анализе работы преобразователя напряжения следует иметь в виду физический закон, согласно которому мгновенная мощность на выходе преобразователя должна быть всегда равна мгновенной мощности на его

входе постоянного тока. Поскольку преобразователь выдает только реактивную мощность, активная мощность на входе, обеспечиваемая заряженным конденсатором, должна быть равна нулю. Более того, поскольку реактивная мощность при нулевой частоте равна нулю, то конденсатор не играет роли в генерации реактивной мощности. Другими словами преобразователь просто объединяет выводы таким путём, что реактивный ток может свободно протекать между ними. Рассматривая это со стороны системы, можно сказать, что преобразователь устанавливает циркулирующий ток среди фаз с нулевым обменом активной мощностью.

Форма выходного напряжения на преобразователе не является идеальной синусоидой. По этой причине выходная мощность имеет пульсирующие компоненты, даже если ток является чистой синусоидой. Таким образом, чтобы не нарушить равенство между входной и выходной мощностями преобразователь должен пропускать пульсирующий ток. Наличие компоненты пульсирующего тока на входе всецело определяется пульсирующей компонентой напряжения на выходе. Искажение кривой напряжения и пульсации тока на конденсаторе теоретически могут снижаться до любой желаемой степени. Таким образом, СТАТКОМ, использующий идеальный преобразователь напряжения, производит синусоидальное напряжение и ток на выходе, и нулевой ток на конденсаторе. На практике вследствие несимметрии в системе и других факторов, а также экономических ограничений идеальные условия не всегда достигаются, но могут аппроксимироваться достаточно удовлетворительно выбором соответствующей структуры преобразователя напряжения, так что размеры конденсатора остаются сравнительно малыми.

СТАТКОМ с внутренней системой управления может рассматриваться как синусоидальный источник напряжения за индуктивностью трансформатора, амплитуда и фазовый угол которого регулируются внешней системой управления через соответствующие опорные сигналы.

СТАТКОМ может выдавать или поглощать одну и ту же величину реактивной мощности, другими словами он имеет один и тот же регулирующий диапазон для ёмкостной и индуктивной мощности. Однако во многих случаях могут потребоваться различные диапазоны для генерации и потребления реактивной мощности. Этого можно достичь комбинированием СТАТКОМ с жёстко подключенными или механически коммутируемыми ШКБ либо ШР (Рисунок 4.6а, б). Более гибкие гибридные схемы в дополнение к СТАТКОМ могут содержать тиристорно коммутируемыми ШКБ и тиристорно управляемые ШР (Рисунок 4.6в).

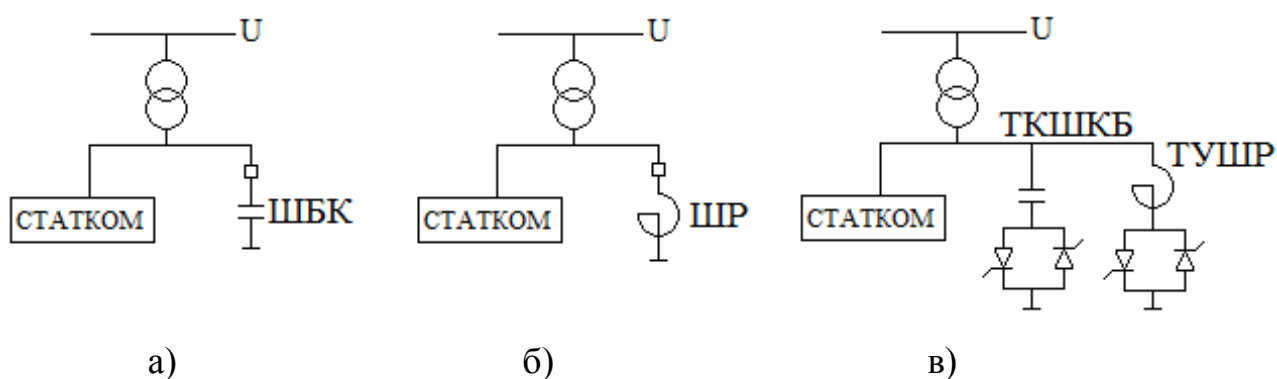


Рисунок 4.6 - Комбинированные схемы СТАТКОМ с другими УШК: а – СТАТКОМ и жёстко подключённая или механически коммутируемая ШКБ; б – СТАТКОМ и жёстко подключённый или механически коммутируемый ШР; в – СТАТКОМ, тиристорно коммутируемая ШКБ и ТУШР

Комбинированные схемы компенсаторов, использующие тиристорно коммутируемые ШКБ, ТУШР и возможно жёстко подключаемые или механически коммутируемые ШКБ или ШР, дают дополнительные возможности для оптимизации характеристик компенсаторов в определённом диапазоне их работы.

Для дальнейшего анализа понадобится соотношение для определения параметров КУ по условию отклонения напряжений. Пусть в некотором пункте сети вводится в работу КУ. Тогда уровни напряжения в этом пункте до и после введения в работу КУ связаны соотношением

$$\frac{U_0 - U}{U} = Y_{KV} Z_{ex}, \quad (4.1)$$

где U_0 , U – напряжения в пункте соответственно до и после введения в работу КУ; Y_{KV} – величина проводимости КУ; Z_{ex} – входное сопротивление сети относительно места установки КУ.

Установленная мощность КУ обычно определяется через наибольшее рабочее напряжение

$$Q_{KV} = Y_{KV} U_{np}^2,$$

а мощность короткого замыкания сети в заданной точке вычисляется через номинальное напряжение сети

$$S_{KЗ} = \frac{U_{ном}^2}{Z_{ex}}.$$

С учётом последних соотношений выражение (4.1) приводится к виду

$$\delta U_0 - \delta U = \frac{U}{U_{ном}} \left(\frac{U_{ном}}{U_{np}} \right)^2 \frac{Q_{KV}}{S_{KЗ}}, \quad (4.2)$$

где δU_0 , δU – отклонения напряжения в месте установки КУ соответственно до и после введения его в работу.

Величина $\Delta \delta U = \delta U_0 - \delta U$ определяет изменение отклонения напряжения за счёт ввода в работу КУ. С достаточной степенью точности можно окончательно записать

$$\Delta \delta U \approx \left(\frac{U_{ном}}{U_{np}} \right)^2 \frac{Q_{KV}}{S_{KЗ}}. \quad (4.3)$$

4.2 Особенности использования компенсирующих устройств в сети 220 и 500 кВ Байкало-Амурской магистрали

Сеть БАМ на настоящий момент на основном своём протяжении представляет двухцепную ВЛ 220 кВ. Натуральная мощность такой линии соответственно при номинальном и наибольшем рабочем напряжении

составляет 250 и 325 МВт. В максимальных режимах работы передаваемая мощность оценивается величиной 200 МВт (максимальный допустимый переток по контролируемому сечению на ПС Киренга составляет 200 МВт). Это означает, что даже в максимально нагруженной сети имеется избыток реактивной мощности, который должен компенсироваться ШР, т.е. КУ одностороннего действия. Причём в силу питания сети с одной стороны, значительная часть мощности ШР должна устанавливаться ближе к разомкнутому концу сети, что и имеет место в существующей сети БАМ.

К 2015 году после перевода на работу ВЛ Усть-Илимская ГЭС – Усть-Кут на напряжение 500 кВ переток мощности по двухцепной ВЛ 220 кВ превысит её натуральную мощность, что будет означать потребность сети 220 кВ в реактивной мощности для поддержания отклонений напряжения в допустимых пределах. Однако при этом необходимо учитывать, что сама ВЛ 500 кВ в пункте примыкания Усть-Кут становится источником реактивной мощности.

Для компенсации зарядной мощности и ограничения внутренних перенапряжений на ВЛ 500 кВ длиной 281 км по её концам устанавливаются по одному ШР каждый мощностью 180 Мвар. Реактивная мощность самой ВЛ 500 кВ со стороны ПС Усть-Кут определяется соотношением

$$Q_{y-k} = Q_{y-k}^{зар} \left[1 - \left(\frac{P}{P_{нат}} \right)^2 \right], \quad (4.4)$$

где $Q_{y-k}^{зар} = -P_{нат} \cdot tg\left(\frac{\beta L}{2}\right)$ – зарядная мощность ВЛ со стороны ПС Усть-Кут;

$\beta \approx 1,06 \cdot 10^{-3}$, рад/км – коэффициент фазы линии; L – длина линии; $P_{нат}$ – натуральная мощность линии; P – передаваемая мощность по линии.

На рисунке 4.7 приведена зависимость реактивной мощности линии со стороны ПС Усть-Кут от передаваемой активной мощности.

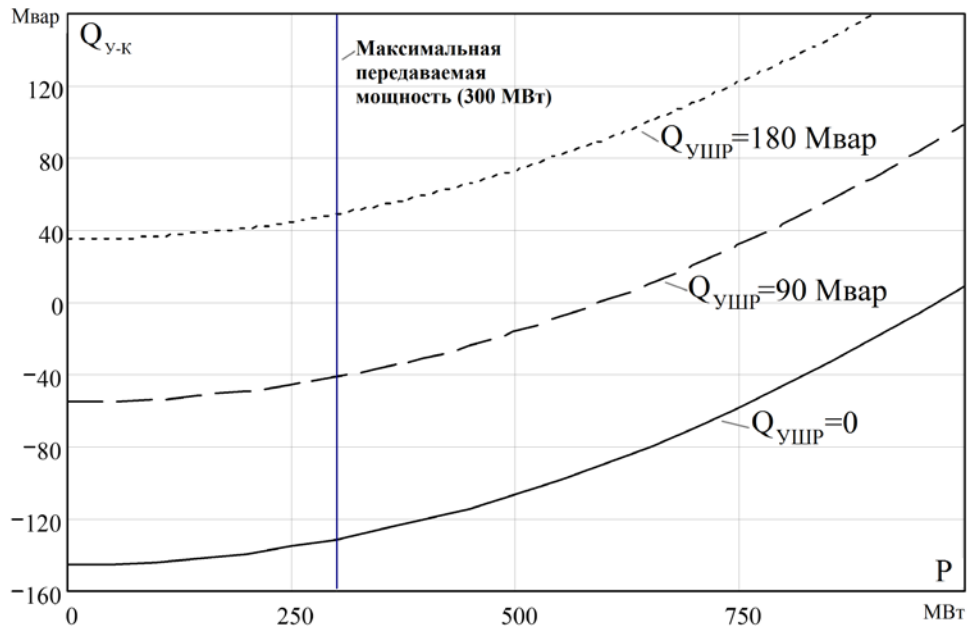


Рисунок 4.7 – Изменение реактивной мощности ВЛ 500 кВ на ПС Усть-Кут в зависимости от передаваемой активной мощности при различной мощности шунтирующего реактора.

Поскольку ВЛ 500 кВ работает в режимах малых нагрузок (не более 300 МВт) по сравнению с натуральной мощностью линии (порядка 900 МВт), то её реактивная мощность практически определяется зарядной мощностью линии и составляет $Q_{у-к} = -(130 - 140)$ Мвар. В том случае, когда реактор подключён к линии, будет иметь место потребление реактивной мощности величиной $Q_{у-к} = (40 - 50)$ Мвар. Если исходить из использования на ВЛ 500 кВ со стороны ПС Усть-Кут управляемого ШР, то при половинной его мощности генерация линией реактивной мощности будет на уровне (40 – 50) Мвар.

Оценим далее регулирующие возможности УШР на ПС Усть-Кут на основе соотношения (4.3). На рисунке 4.8 показано изменение отклонения напряжения на шинах 220 кВ ПС Усть-Кут в зависимости от мощности УШР 500 кВ, введённой в работу. При полностью введённом реакторе отклонения напряжения можно снизить почти на 6%.

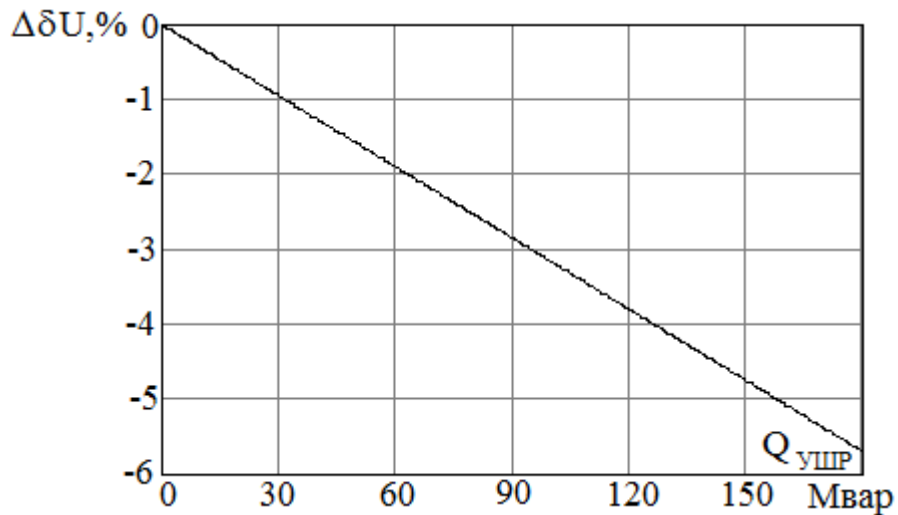


Рисунок 4.8 – Изменение отклонений напряжения на ПС Усть-Кут в зависимости от мощности УШР 500 кВ.

При анализе отклонений напряжения необходимо также учитывать, что к 2015 году на шинах 220 кВ ПС Таксимо будет установлен УШР мощностью 100 Мвар. На рисунке 4.9 показаны (на основе соотношения (4.3)) регулирующие возможности этого УШР. При полностью введённом УШР отклонения напряжения могут быть снижены на 15%.

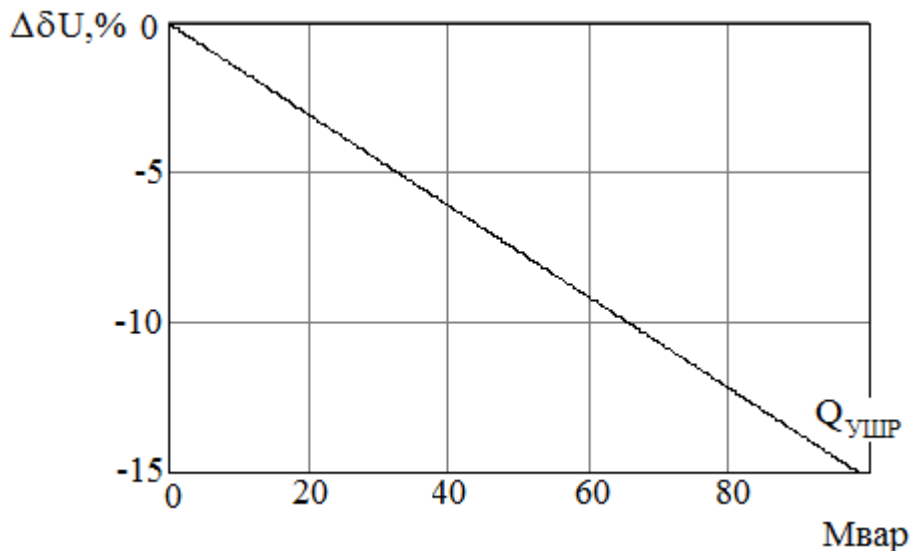


Рисунок 4.9 – Изменение отклонений напряжения на ПС Таксимо в зависимости от мощности УШР 220 кВ.

При расчёте отклонений напряжения в ЗРД в качестве отправного варианта был принят раздел на ПС Таксимо при работе без Мамаканской ГЭС. При этом УШР на ПС Усть-Кут потреблял половинную его мощность. УШР на ПС Таксимо был задействован незначительной его мощностью (20%). В результате отклонения напряжения находятся в допустимых пределах, и кроме того свободные регулирующие мощности УШР на ПС Усть-Кут и Таксимо дают возможность уменьшить пределы отклонения, если такая потребность возникнет.

При проведении расчётов для других точек раздела состав КУ оставался таким же, как и в предыдущем случае. Проведённые расчеты показали, что при разделах на всех других ПС регулировочные возможности УШР на ПС Усть-Кут и Таксимо достаточны для введения отклонений напряжения в допустимую область.

4.3 Типы симметрирующих устройств и основные положения по выбору их параметров

Симметрирующее устройство (СУ) представляет элемент, обеспечивающий снижение коэффициента обратной последовательности в месте его установки вплоть до нуля и соответственно уменьшение названного коэффициента в других точках сети. СУ состоит из пофазно регулируемых индуктивно-емкостных элементов, подключенных либо к линии (рисунок 4.10), либо к обмотке трансформатора (автотрансформатора), соединенной по схеме треугольника (рисунок 4.11, 4.12) [68, 80-86].

Следует отметить комплексный подход по повышению качества электроэнергии, включающий снижение отклонений напряжения, несимметрии и уровня гармоник, с помощью активных кондиционеров напряжения [63]. Однако недостатком таких устройств является их большая стоимость и повышенная мощность. Более целесообразным, как отмечается в этой работе, оказывается вариант снижения несимметрии и улучшения

гармонического состава с помощью отдельных устройств, что позволяет снизить требования к ним.

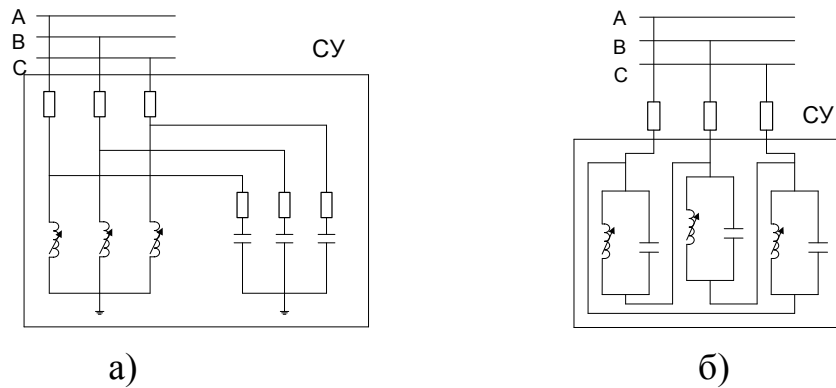


Рисунок 4.10 – СУ на стороне ВН подстанции: а – соединение по схеме звезда; б – соединение по схеме треугольник.

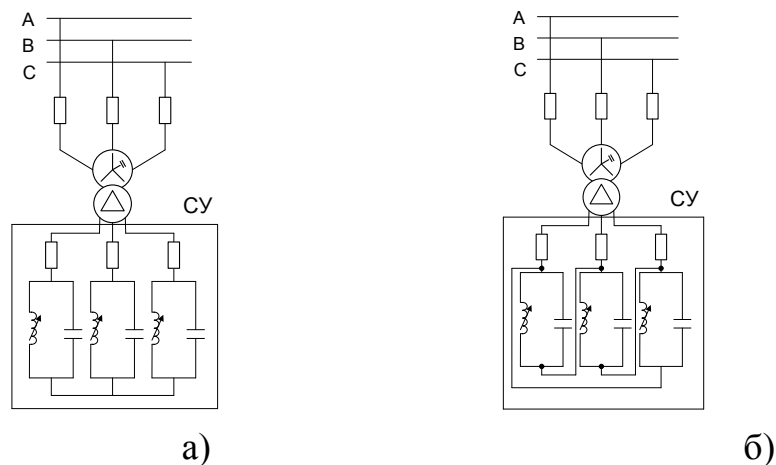


Рисунок 4.11 – Подмагничиваемое СУ на стороне НН подстанции: а - соединение СУ по схеме звезда; б - соединение СУ по схеме треугольник.

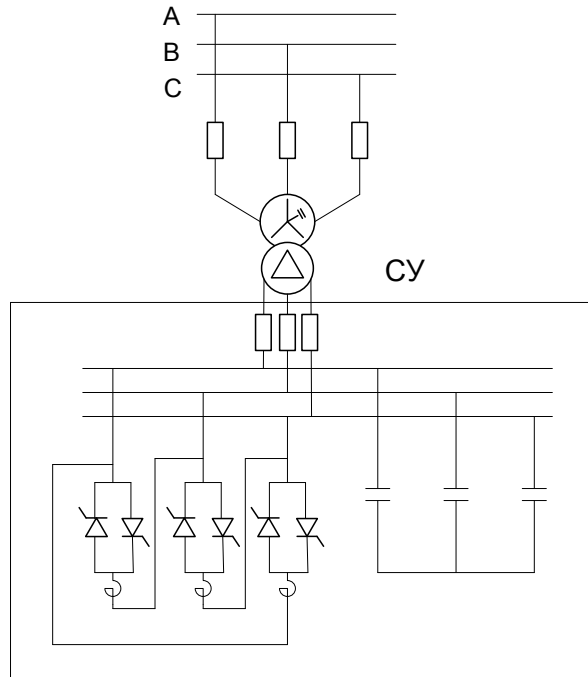
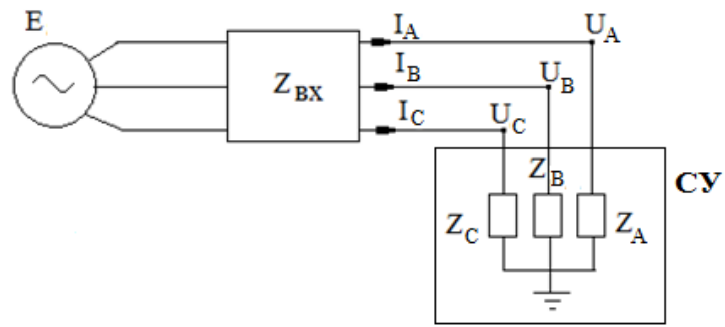
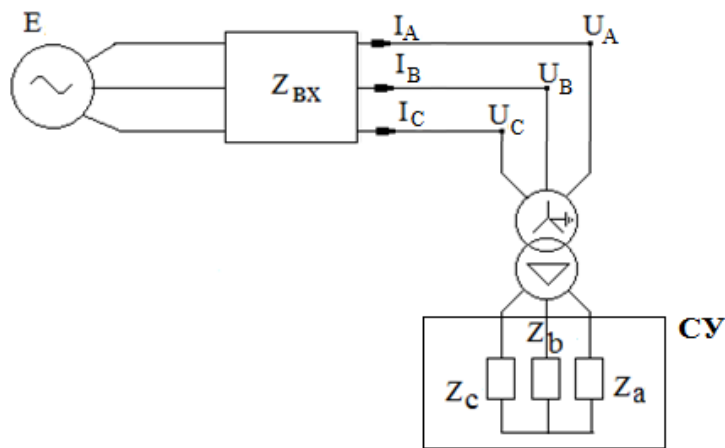


Рисунок 4.12 – Тиристорное СУ на стороне НН подстанции.

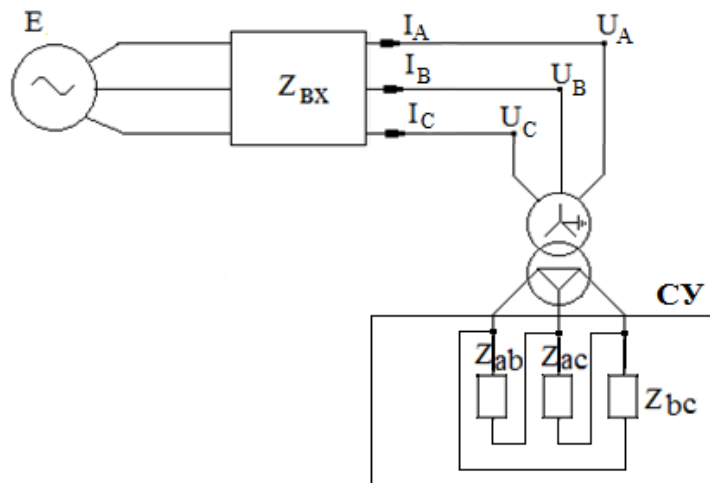
Как показал анализ, для введения коэффициентов несимметрии в допустимую область вдоль всей трассы БАМ, достаточно установки СУ на одной из ПС, где имеют место наибольшие коэффициенты несимметрии. Тогда расчетную схему для выбора параметров СУ можно представить (согласно теореме об эквивалентном генераторе) вектором эквивалентных фазных эдс и матрицей входных фазных и межфазных сопротивлений всей схемы БАМ относительно ПС, на которой устанавливаются СУ (рисунок 4.13). Вектор эквивалентных эдс представляет собой напряжение на ПС при отключённом СУ.



а)



б)



в)

Рисунок 4.13 – Расчетные схемы для определения параметров СУ:
 а – СУ на высокой стороне; б – СУ, включенное по схеме звезды на низкой стороне трансформатора; в – СУ, включенное по схеме треугольника на низкой стороне трансформатора.

Запишем уравнения расчетной схемы в фазных координатах в матричной форме

$$\begin{aligned}\underline{E} &= \underline{U} + \underline{Z}_{\text{вх}} \underline{I}, \\ \underline{U} &= \underline{Z} \underline{I},\end{aligned}\tag{4.5}$$

где $\underline{E} = \begin{vmatrix} \underline{E}_a \\ \underline{E}_b \\ \underline{E}_c \end{vmatrix}$ – вектор эквивалентных ЭДС;

$\underline{U} = \begin{vmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{vmatrix}$ – вектор напряжений после введения в работу СУ;

$\underline{I} = \begin{vmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{vmatrix}$ – вектор токов на стороне линии;

$\underline{Z}_{\text{вх}} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{\text{вх.aa}} & \underline{Z}_{\text{вх.ab}} & \underline{Z}_{\text{вх.ac}} \\ \underline{Z}_{\text{вх.ba}} & \underline{Z}_{\text{вх.bb}} & \underline{Z}_{\text{вх.bc}} \\ \underline{Z}_{\text{вх.ca}} & \underline{Z}_{\text{вх.cb}} & \underline{Z}_{\text{вх.cc}} \end{vmatrix}$ – матрица входных собственных и взаимных

сопротивлений питающей сети относительно места установки СУ;

$\underline{Z} = \underline{Z}_{\text{СУ}} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{\text{aa}} & \underline{Z}_{\text{ab}} & \underline{Z}_{\text{ac}} \\ \underline{Z}_{\text{ba}} & \underline{Z}_{\text{bb}} & \underline{Z}_{\text{bc}} \\ \underline{Z}_{\text{ca}} & \underline{Z}_{\text{cb}} & \underline{Z}_{\text{cc}} \end{vmatrix}$ – матрица искомых параметров СУ, определенных

относительно точки его подсоединения к линии.

Вид последней матрицы зависит от рассматриваемой расчетной схемы. Для схемы с расположением СУ на высокой стороне при соединении по схеме Y_0 (рисунок 4.13а) имеем

$$\underline{Z} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_a & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_b & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_c \end{vmatrix}$$

Для схемы с расположением СУ за трансформатором (автотрансформатором) со схемой соединения обмоток Y_0/Δ , а СУ по схеме звезды (рисунок 4.13б) матрица искомых параметров имеет вид

$$\underline{Z} = \frac{1}{3} \cdot \begin{vmatrix} 3\underline{Z}_T + \underline{Z}_a + \underline{Z}_b & -\underline{Z}_b & -\underline{Z}_a \\ -\underline{Z}_b & 3\underline{Z}_T + \underline{Z}_c + \underline{Z}_b & -\underline{Z}_c \\ -\underline{Z}_a & -\underline{Z}_c & 3\underline{Z}_T + \underline{Z}_a + \underline{Z}_c \end{vmatrix}. \quad (4.6)$$

При этом, поскольку нулевая последовательность в самом СУ отсутствует, нейтральная точка имеет нулевой потенциал, и соответственно не имеет значения, заземлена или разомкнута нейтраль СУ с точки зрения нормальных режимов его работы. Отсюда вытекает, что параметры СУ, имеющего схему соединения по треугольнику, могут быть найдены на основе параметров СУ по схеме звезды путем использования известных соотношений для преобразования звезды сопротивлений в треугольник сопротивлений

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{ab} &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_b + \frac{\underline{Z}_a \underline{Z}_b}{\underline{Z}_c}, \\ \underline{Z}_{ac} &= \underline{Z}_a + \underline{Z}_c + \frac{\underline{Z}_a \underline{Z}_c}{\underline{Z}_b}, \\ \underline{Z}_{bc} &= \underline{Z}_c + \underline{Z}_b + \frac{\underline{Z}_c \underline{Z}_b}{\underline{Z}_a}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Отметим, что соотношениями (4.6, 4.7) можно воспользоваться для случая расположения СУ на стороне ВН подстанции при треугольном соединении СУ (рисунок 4.10б). Для этого надо положить в (4.6) $\underline{Z}_T = 0$.

Поскольку активная составляющая сопротивлений СУ и трансформатора незначительна по сравнению с реактивной, то в дальнейшем будем принимать

$$\underline{Z}_a \approx jX_a, \quad \underline{Z}_b \approx jX_b, \quad \underline{Z}_c \approx jX_c, \quad \underline{Z}_T \approx jX_T.$$

Тогда матрица сопротивлений СУ может быть представлена зависящей от реактивных сопротивлений отдельных фазных элементов

$$\underline{Z} = \underline{Z}(X_a, X_b, X_c).$$

Решив второе уравнение системы (4.5) относительно тока и подставив в первое уравнение, найдем

$$\underline{E} = [1_3 + \underline{Z}_{\text{вх}} \underline{Y}(X_a, X_b, X_c)] \underline{U}, \quad (4.8)$$

где $1_3 = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$ – единичная матрица третьего порядка;

$\underline{Y}(\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c) = \underline{Z}^{-1}(\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c)$ – матрица проводимостей СУ, равная обратной матрице сопротивлений СУ.

На основе этого уравнения можно реализовать первый подход для выбора параметров СУ. Этот подход достаточно очевиден и предполагает выравнивание модулей фазных напряжений

$$|\underline{U}_a| = |\underline{U}_b| = |\underline{U}_c| \quad (4.9)$$

Отметим, что выполнение условия (4.9) не означает, что напряжение обратной последовательности будет сводиться к нулю. Дело в том, что при выравнивании модулей фазных напряжений фазовый сдвиг между ними не приводится к 120° , и поэтому полной компенсации напряжения обратной последовательности не происходит, хотя заметное его снижение имеет место.

Матричное уравнение (4.8) представляет систему трех уравнений, решение которых и дает искомые параметры $\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c$ при заданных векторе эквивалентных эдс и входном сопротивлении сети $\underline{Z}_{вх}$. В общем случае разрешить эту систему уравнений аналитически не представляется возможным, и необходимо использовать численные методы, что при современной вычислительной технике не представляет проблемы.

Второй подход к выбору параметров СУ формулируется исходя из основной функции, которая возлагается на СУ, а именно, максимальное снижение напряжения обратной последовательности в месте установки СУ. При этом можно потребовать, чтобы СУ не оказывало влияние на напряжение прямой последовательности, что будет иметь место, если ток прямой последовательности, протекающий через СУ, будет равен нулю. Таким образом, при втором подходе условия для выбора параметров СУ запишутся

$$\underline{U}_2 = 0, \quad \underline{I}_1 = 0 \quad (4.10)$$

где индекс 2 означает обратную последовательность, а индекс 1 – прямую.

Для использования второго подхода необходимо систему уравнений в фазных координатах (4.5) записать относительно симметричных составляющих. Воспользовавшись матрицей преобразования от фазных координат к симметричным составляющим запишем

$$\begin{aligned}\underline{E}_{\text{сим}} &= \underline{U}_{\text{сим}} + \underline{Z}_{\text{вх.сим}} \underline{I}_{\text{сим}}, \\ \underline{U}_{\text{сим}} &= \underline{Z}_{\text{сим}} \underline{I}_{\text{сим}},\end{aligned}\quad (4.11)$$

где $\underline{E}_{\text{сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{E} = \begin{vmatrix} \underline{E}_1 \\ \underline{E}_2 \\ \underline{E}_0 \end{vmatrix}$ – вектор эквивалентных эдс для симметричных

составляющих;

$\underline{U}_{\text{сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{U} = \begin{vmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{vmatrix}$ – вектор напряжений для симметричных составляющих.

В систему (4.11) входят

матрица входных собственных и взаимных сопротивлений питающей сети относительно места установки СУ для симметричных составляющих

$$\underline{Z}_{\text{вх.сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{Z}_{\text{вх}} \underline{S} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{\text{вх}11} & \underline{Z}_{\text{вх}12} & \underline{Z}_{\text{вх}10} \\ \underline{Z}_{\text{вх}21} & \underline{Z}_{\text{вх}22} & \underline{Z}_{\text{вх}20} \\ \underline{Z}_{\text{вх}01} & \underline{Z}_{\text{вх}02} & \underline{Z}_{\text{вх}00} \end{vmatrix}\quad (4.12)$$

и матрица сопротивлений СУ относительно симметричных составляющих

$$\underline{Z}_{\text{сим}}(\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c) = \underline{S}^{-1} \underline{ZS} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & \underline{Z}_{10} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & \underline{Z}_{20} \\ \underline{Z}_{01} & \underline{Z}_{02} & \underline{Z}_{00} \end{vmatrix}\quad (4.13)$$

Особенностью матрицы входных сопротивлений является то, что её недиагональные элементы более чем на порядок меньше диагональных и то, что собственные входные сопротивления по прямой и обратной последовательностям являются идентичными

$$\underline{Z}_{\text{вх}11} = \underline{Z}_{\text{вх}22} = \underline{Z}_{\text{вх}}.$$

Поэтому с достаточной степенью точности матрицу входных сопротивлений можно представить в виде

$$\underline{Z}_{\text{вх.сим}} \approx \begin{vmatrix} \underline{Z}_{\text{вх}} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{\text{вх}} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{\text{вх}00} \end{vmatrix} \quad (4.14)$$

Матрица сопротивлений СУ есть функция его искомым фазных сопротивлений

$$\underline{Z}_{\text{сим}} = \underline{Z}_{\text{сим}}(\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c).$$

Решение системы (4.11) при выполнении условий (4.10) дает искомые параметры $\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c$. При решении системы (4.11) задается еще одно дополнительное условие, состоящее в том, чтобы коэффициент нулевой последовательности не превышал допустимую величину

$$K_{0U} = \frac{U_0}{U_{\text{ном}}} 100 \leq K_{0U\text{доп}} = 2\% .$$

Как правило, для рассматриваемой сети это условие выполняется со значительным запасом, как в месте установки СУ, так и в остальных точках сети.

В общем случае для определения фазных параметров СУ система уравнений (4.11) должна решаться численным методом. Примечательным является тот факт, что для случая расположения симметрирующего устройства за трансформатором эта система имеет простое решение, позволяющее аналитически найти искомые параметры СУ. Действительно, матрица искомым параметров СУ (4.6) для симметричных составляющих после проведения преобразований принимает вид

$$\underline{Z}_{\text{сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{Z} \underline{S} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & 0 \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_T \end{vmatrix} \quad (4.15)$$

где $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{22} = j \left(X_T + \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \right)$ – собственное входное сопротивление СУ по прямой (или обратной) последовательности относительно места его подключения;

$\underline{Z}_{12} = -\frac{j}{3}(a^2 X_a + a X_b + X_c)$, $\underline{Z}_{21} = -\frac{j}{3}(a X_a + a^2 X_b + X_c)$ – взаимные входные сопротивления между каналами прямой и обратной последовательности СУ, определенные относительно места его подключения.

Запишем матричную систему уравнений (4.11) относительно переменных по прямой и обратной последовательностям в развернутом виде

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= \underline{U}_1 + \underline{Z}_{\text{вх}} \underline{I}_1 \\ \underline{E}_2 &= \underline{U}_2 + \underline{Z}_{\text{вх}} \underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{11} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{12} \underline{I}_2 \\ \underline{U}_2 &= \underline{Z}_{21} \underline{I}_1 + \underline{Z}_{22} \underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

Учитывая условия (4.10) для выбора параметров СУ, перепишем предыдущие системы уравнений (4.16. 4.17)

$$\left. \begin{aligned} \underline{E}_1 &= \underline{U}_1 \\ \underline{E}_2 &= \underline{Z}_{\text{вх}} \underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.18)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_{12} \underline{I}_2 \\ 0 &= \underline{Z}_{22} \underline{I}_2 \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

Из второго уравнения системы (4.19) вытекает первое требование к параметрам СУ

$$\underline{Z}_{22} = 0 \quad (4.20)$$

Из первых уравнений систем (4.18) и (4.19) следует

$$\underline{E}_1 = \underline{Z}_{12} \underline{I}_2 \quad (4.21)$$

Тогда на основании (4.21) с учетом второго уравнения системы (4.18) имеем второе требование к выбору параметров СУ

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} \underline{Z}_{\text{вх}} \quad (4.22)$$

Правая часть уравнения (4.22) представляет некое сопротивление, величина которого зависит от параметров режима и соответственно изменяется при работе сети. Назовем его режимным параметром и обозначим

$$\underline{Z}_{\text{реж}} = R_{\text{реж}} + jX_{\text{реж}} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{E}_2} \underline{Z}_{\text{вх}} \quad (4.23)$$

В результате имеем следующие уравнения для определения параметров симметрирующего устройства

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{22} &= j \left(X_T + \frac{X_a + X_b + X_c}{3} \right) = 0 \\ \underline{Z}_{12} &= -\frac{j}{3} (a^2 X_a + a X_b + X_c) = R_{\text{реж}} + jX_{\text{реж}} \end{aligned} \right\} \quad (4.24)$$

Решив эти уравнения относительно искомых параметров СУ, найдем

$$\begin{aligned} X_a &= X_{\text{реж}} - \sqrt{3}R_{\text{реж}} - X_T, \\ X_b &= X_{\text{реж}} + \sqrt{3}R_{\text{реж}} - X_T, \\ X_c &= -2X_{\text{реж}} - X_T. \end{aligned} \quad (4.25)$$

Выражения (4.25) для определения фазных сопротивлений симметрирующего устройства на основе режимного сопротивления получены впервые и составляют научную новизну работы. Таким образом, режимное сопротивление и соответственно параметры СУ зависят от напряжений по прямой и обратной последовательности в месте подключения и входного сопротивления схемы по обратной последовательности относительно места подключения СУ.

Для определения фазных мощностей самого СУ достаточно определить токи, протекающие по его фазам. На основе уравнений трансформатора и СУ получаем следующее матричное уравнение для этой цели

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_a \\ \underline{I}_b \\ \underline{I}_c \end{pmatrix} = \sqrt{3} \begin{pmatrix} 3\underline{Z}_T + 2\underline{Z}_a & -\underline{Z}_b & -\underline{Z}_c \\ -\underline{Z}_a & 3\underline{Z}_T + 2\underline{Z}_b & -\underline{Z}_c \\ -\underline{Z}_a & -\underline{Z}_b & 3\underline{Z}_T + 2\underline{Z}_c \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_a \\ \underline{U}_b \\ \underline{U}_c \end{pmatrix}, \quad (4.26)$$

где $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ – токи, протекающие по фазам СУ (приведенные к высокой стороне); $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c, \underline{Z}_T$ – сопротивления фаз СУ и трансформатора, приведенные к высокой стороне; $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c$ – напряжения на линии.

Соответственно мощности, потребляемые или генерируемые СУ, найдутся

$$\underline{S}_a = \underline{Z}_a |\underline{I}_a|^2, \quad \underline{S}_b = \underline{Z}_b |\underline{I}_b|^2, \quad \underline{S}_c = \underline{Z}_c |\underline{I}_c|^2. \quad (4.27)$$

Вышеприведённые соотношения для токов и мощностей относятся к случаю соединения фаз СУ по схеме звезды. Если же фазные элементы СУ соединены по схеме треугольника, то соответствующие токи находятся как

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{Z}_a \underline{I}_a - \underline{Z}_b \underline{I}_b}{\underline{Z}_{ab}}, \\ \underline{I}_{ac} &= \frac{\underline{Z}_c \underline{I}_c - \underline{Z}_a \underline{I}_a}{\underline{Z}_{ac}}, \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{Z}_b \underline{I}_b - \underline{Z}_c \underline{I}_c}{\underline{Z}_{bc}}, \end{aligned} \quad (4.28)$$

где межфазовые сопротивления СУ $\underline{Z}_{ab}, \underline{Z}_{ac}, \underline{Z}_{bc}$ связаны с его фазными сопротивлениями $\underline{Z}_a, \underline{Z}_b, \underline{Z}_c$ соотношениями (4.7).

Мощности соответствующих ветвей СУ составят

$$\underline{S}_{ab} = \underline{Z}_{ab} |\underline{I}_{ab}|^2, \quad \underline{S}_{ac} = \underline{Z}_{ac} |\underline{I}_{ac}|^2, \quad \underline{S}_{bc} = \underline{Z}_{bc} |\underline{I}_{bc}|^2. \quad (4.29)$$

4.4 Анализ эффективности применения симметрирующих устройств для снижения несимметрии в сети внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали

На основе вышеприведенной методики выбраны параметры симметрирующих устройств. Ниже приведены результаты расчета режима работы сети при установке СУ в месте наибольшей несимметрии.

4.4.1 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Таксимо

Условная схема сети при разделе на ПС Таксимо показана на рисунке 4.14.

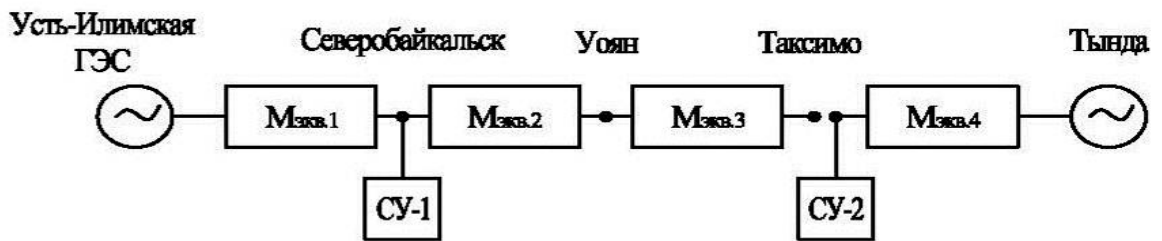


Рисунок 4.14 – Раздел СВЭ на ПС Таксимо

Результаты расчета несимметрии для западной части БАМ приведены в таблице 4.1 и на рисунке 4.15, для восточной части – в таблице 4.2 и на рисунке 4.16.

Таблица 4.1 - Коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %
УИГЭС	0
Рудногорск	0,21
Коршуниха	0,36
Усть-Кут	0,69
Лена	0,75
Якурим	1
Звездная	0,8
Ния	0,88
Киренга	0,6
Улькан	0,5
Кунерма	0,33
Дабан	0,29
С/байкальск	0
Кичера	0,215
Ангоя	0,157
Уоян	0,29
Янчукан	0,25
Ангаракан	0,52
Перевал	0,21
Окусикан	0,54
Таксимо	0,24

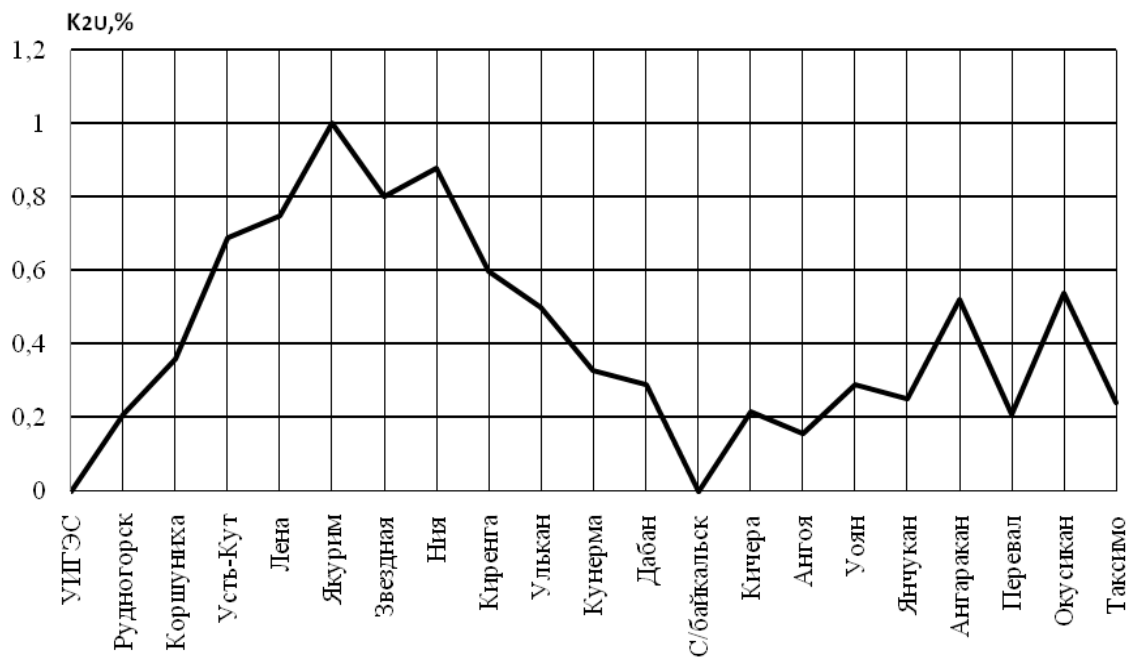


Рисунок 4.15 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

Несимметрия практически на всех подстанциях западного участка БАМ находится в пределах нормы. Таким образом для поддержания допустимого коэффициента несимметрии в западной части сети БАМ необходимо установить СУ мощностью 52 МВА на ПС Северобайкальск.

Таблица 4.2 - Коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %
Таксимо	0
Куанда	0,19
Чара	0,31
Хани	0,74
Юктали	0,77
Лопча	0,64
Хорогочи	0,42
Тында	0,3

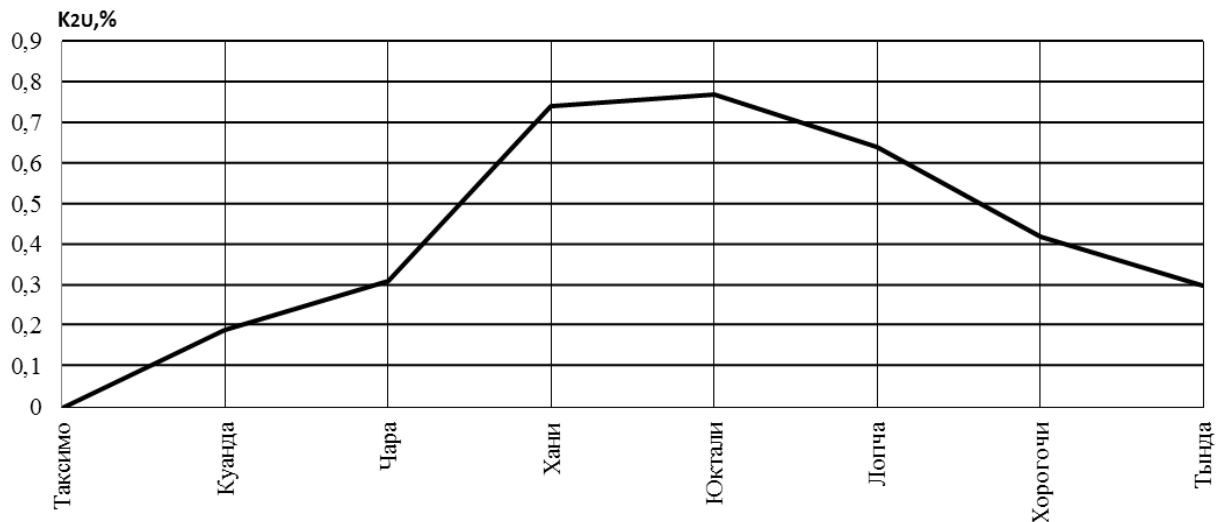


Рисунок 4.16 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

Несимметрия на всех подстанциях восточного участка БАМ в данном режиме находится в пределах нормы. Таким образом для поддержания допустимого коэффициента несимметрии в восточной части сети БАМ необходимо установить СУ мощностью 7 МВА на ПС Таксимо.

4.4.2 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Уоян

Условная схема сети при разделе на ПС Уоян показана на рисунке 4.17.

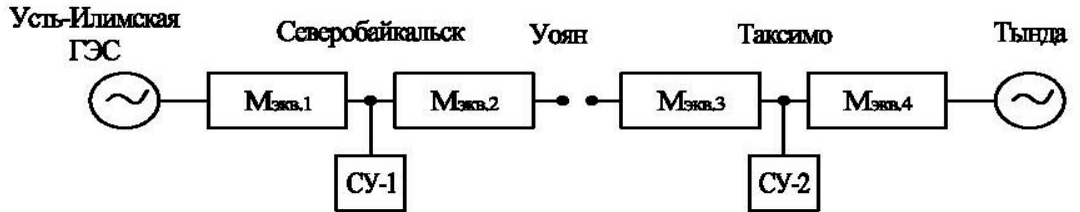


Рисунок 4.17 – Раздел СВЭ на ПС Уоян

Результаты расчета отклонений напряжений и несимметрии для западной части БАМ приведены в таблице 4.3 и на рисунке 4.18, для восточной части – в таблице 4.4 и на рисунке 4.19.

Таблица 4.3 - Коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %
УИГЭС	0
Рудногорск	0,21
Коршуниха	0,37
Усть-Кут	0,69
Лена	0,75
Якурим	1
Звездная	0,79
Ния	0,86
Киренга	0,57
Улькан	0,47
Кунерма	0,3
Дабан	0,27
С/байкальск	0
Кичера	0,177
Ангоя	0,09
Уоян	0,217

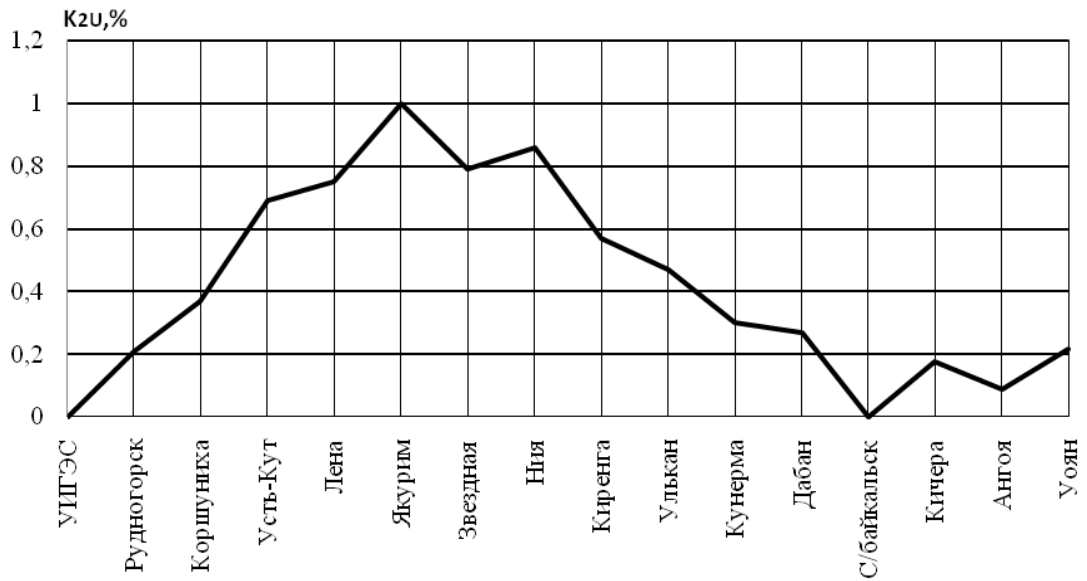


Рисунок 4.18 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

Несимметрия на всех подстанциях западного участка БАМ находится в пределах нормы. Таким образом для поддержания допустимого коэффициента несимметрии в западной части сети БАМ необходимо установить СУ мощностью 25 МВА на ПС Северобайкальск.

Таблица 4.4 - Коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}, \%$
Уоян	0,6
Янчукан	0,5
Ангаракан	0,53
Перевал	0,34
Окусикан	0,48
Таксимо	0
Куанда	0
Чара	0,01
Хани	0,01
Юктали	0,01
Лопча	0
Хорогочи	0
Тында	0

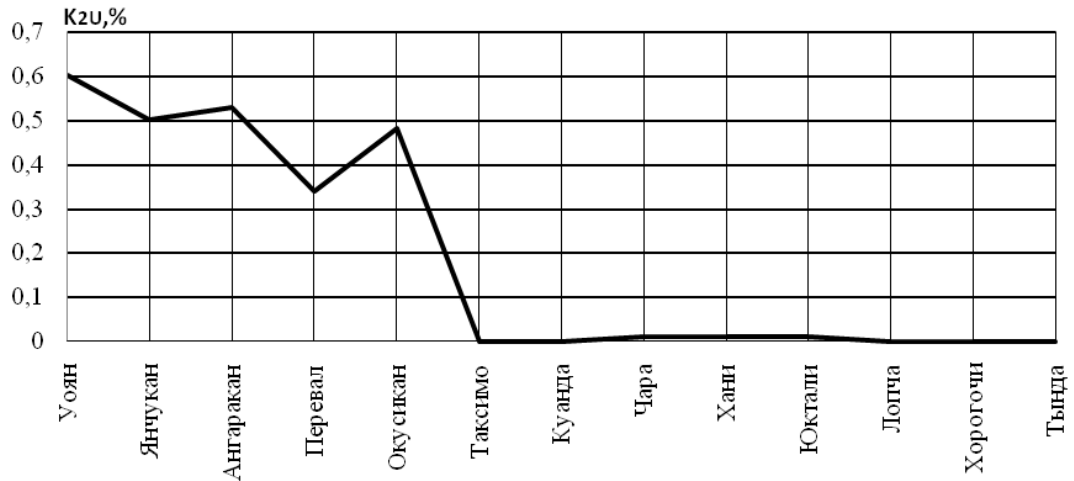


Рисунок 4.19 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

Несимметрия на всех подстанциях восточного участка БАМ в данном режиме находится в пределах нормы. Таким образом для поддержания допустимого коэффициента несимметрии в восточной части сети БАМ необходимо установить СУ мощностью 15 МВА на ПС Таксимо.

4.4.3 Раздел сети внешнего электроснабжения на подстанции Северобайкальск

Условная схема сети при разделе на ПС Северобайкальск показана на рисунке 4.20.

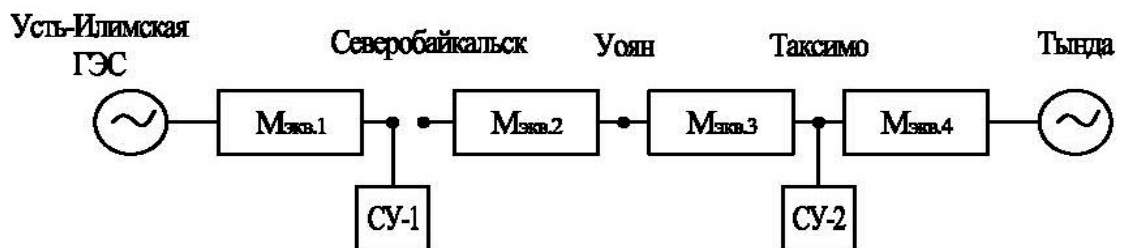


Рисунок 4.20 – Раздел СВЭ на ПС Уоян

Результаты расчета отклонений напряжений и несимметрии для западной части БАМ приведены в таблице 4.5 и на рисунке 4.21, для восточной части – в таблице 4.6 и на рисунке 4.22.

Таблица 4.5 - Коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %
УИГЭС	0
Рудногорск	0,21
Коршуниха	0,37
Усть-Кут	0,68
Лена	0,74
Якурим	0,98
Звездная	0,78
Ния	0,85
Киренга	0,57
Улькан	0,47
Кунерма	0,3
Дабан	0,27
С/байкальск	0

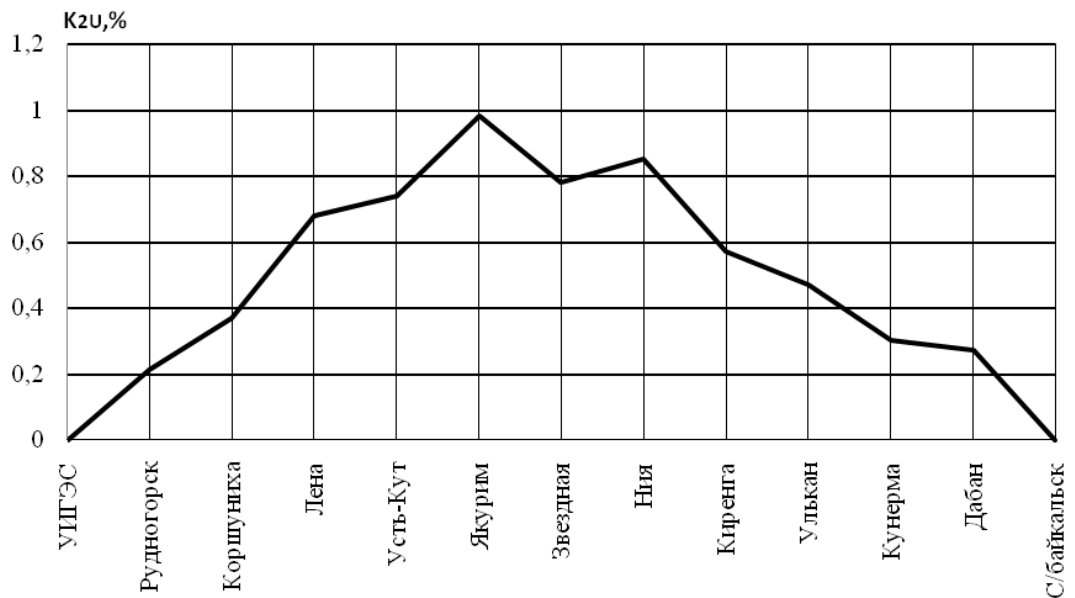


Рисунок 4.21 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

Несимметрия на всех подстанциях западного участка БАМ находится в пределах нормы. Таким образом для поддержания допустимого

коэффициента несимметрии в западной части сети БАМ необходимо установить СУ мощностью 21 МВА на ПС Северобайкальск.

Таблица 4.6 - Коэффициенты несимметрии

Подстанция	$k_{2U_{max}}$, %
С/байкальск	1,15
Кичера	1,14
Ангоя	0,89
Уоян	0,84
Янчукан	0,57
Ангаракан	0,69
Перевал	0,36
Окусикан	0,58
Таксимо	0
Куанда	0,06
Чара	0,06
Хани	0,05
Юктали	0,04
Лопча	0,03
Хорогочи	0,01
Тында	0,01

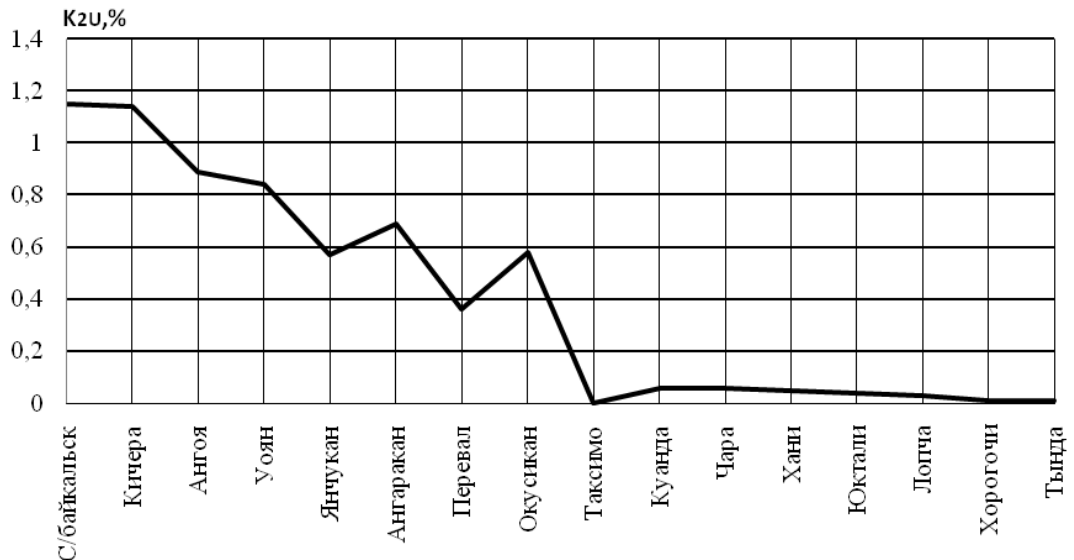


Рисунок 4.22 – Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

Несимметрия на всех подстанциях восточного участка БАМ в данном режиме находится в пределах нормы. Таким образом для поддержания

допустимого коэффициента несимметрии в восточной части сети БАМ необходимо установить СУ мощностью 15 МВА на ПС Таксимо.

Полученные результаты подтверждают предположение о том, что для снижения уровней несимметрии вдоль всей сети БАМ достаточно установки одного СУ (по одному в каждую часть сети в случае раздельной работы) в месте наибольшей несимметрии. При этом требуемая мощность СУ не превышает 25 МВА.

ГЛАВА 5 СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРАМИ СИММЕТРИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

5.1 Обоснование алгоритма управления параметрами симметрирующего устройства

Как было показано в предыдущей главе, параметры СУ определяются величиной режимного сопротивления, которое, в свою очередь, зависит от двух режимных параметров (напряжений холостого хода прямой и обратной последовательности в месте установки СУ) и входного сопротивления сети по обратной (прямой) последовательности относительно пункта размещения СУ. Для обоснования способа снижения несимметрии проанализируем, каким образом вышеназванные режимные параметры изменяются на межпоездном интервале. Проведём этот анализ для зимнего рабочего дня при разделе на ПС Таксимо.

Как показывает анализ, модуль напряжения последовательности на межпоездном интервале меняется в десятки раз (Рисунок 5.1), а фаза напряжения обратной последовательности в средней части межпоездного интервала претерпевает изменения близкие к 180° по сравнению с начальной и конечной частью межпоездного интервала (Рисунок 5.2) [59]. Отсюда вытекает определяющее влияние изменений напряжения обратной последовательности на выбор способа снижения несимметрии.

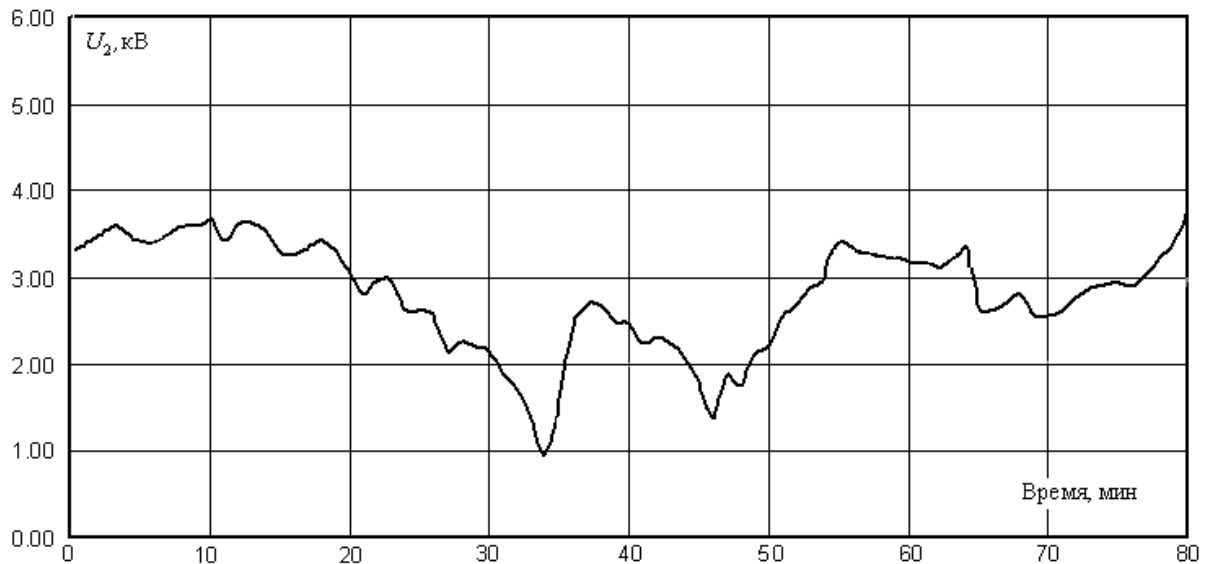


Рисунок 5.1 – Изменение модуля напряжения обратной последовательности на межпоездном интервале для ПС Таксимо.

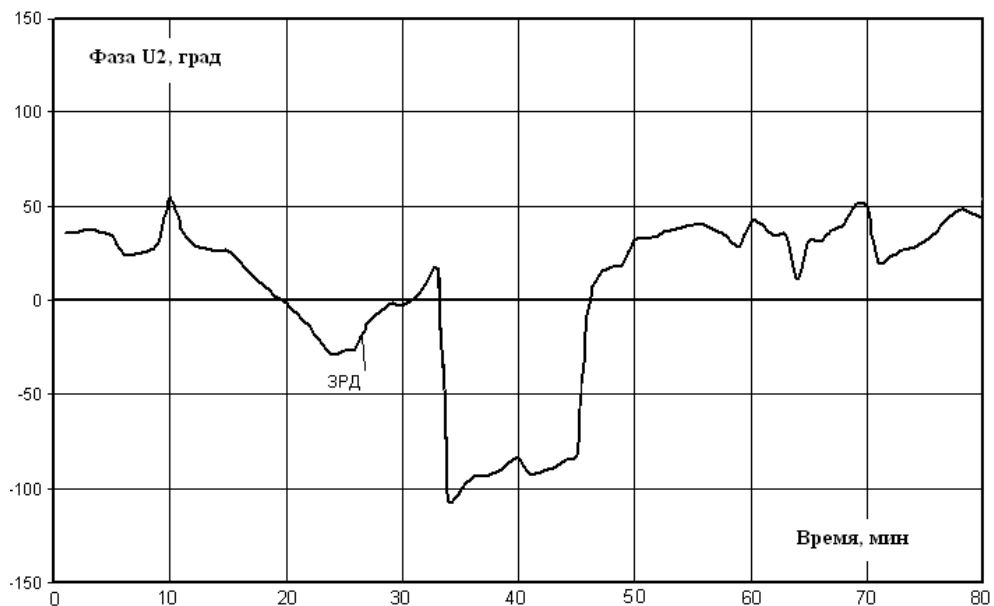


Рисунок 5.2 – Изменение фазы напряжения обратной последовательности на межпоездном интервале для ПС Таксимо.

Анализ изменения входного сопротивления сети относительно места установки СУ показал слабую его зависимость от момента времени на межпоездном интервале. Так, например, различие входных сопротивлений в конечных точках и в средней части межпоездного интервала составляет порядка одного процента. Более заметное различие входных сопротивлений

имеет место при рассмотрении режимов в различные характерные дни (летний рабочий день, зимний выходной день и летний выходной день).

Рассмотрение несимметрии по обратной последовательности на межпоездном интервале показывает, что заметным образом несимметрия меняется каждые 1-2 минуты. Поэтому вполне достаточно принять поминутный контроль за уровнем несимметрии.

Тогда предлагаемый способ снижения несимметрии будет включать следующую последовательность действий.

1. Замер фазных напряжений и токов на зажимах симметрирующего устройства, на основе которых рассчитываются напряжения и токи прямой и обратной последовательности и коэффициент несимметрии по напряжению.

2. Сравнение коэффициента несимметрии по напряжению с его пороговым значением $K_{2Uпор}$, которое выбирается так, чтобы в любой точке сети коэффициент несимметрии в нормальных режимах не превосходил допустимой величины $K_{2Uдон} = 2\%$. (Предварительный анализ показал, что пороговую величину коэффициента несимметрии, которую можно допустить в месте установки СУ, достаточно принять

$$K_{2Uпоп} \approx 0,3 \%$$

3. Если измеренный для данной минуты в момент t_0 коэффициент несимметрии удовлетворяет условию

$$K_{2U}(t_0) \leq K_{2Uпор},$$

то параметры СУ остаются неизменными, и через минуту действия повторяются, начиная с пункта 1.

4. Если рассчитанный для данной минуты в момент t_0 коэффициент несимметрии оказался больше пороговой величины

$$K_{2U}(t_0) > K_{2Uпор},$$

то на основе измеренных величин определяется режимный параметр согласно соотношениям (4.16, 4.23), находятся по (4.25) и устанавливаются

параметры СУ, которые обеспечивают полную компенсацию напряжения обратной последовательности согласно условиям (4.10).

5. Через минуту в момент $t_0 + 1_{мин}$ последовательность действий повторяется, начиная с пункта 1.

Входное сопротивление схемы относительно места установки СУ может корректироваться на основе теоретических расчетов или практическим путем. В последнем случае это осуществляется следующим образом. Отключив СУ путем установки во всех фазах нулевой проводимости, замеряются фазные напряжения и определяются напряжения прямой и обратной последовательности, которые согласно (4.5) представляют соответствующие ЭДС

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_1, \quad \underline{E}_2 = \underline{U}_2.$$

Далее установив на СУ номинальные проводимости во всех фазах, измеряют новые фазные напряжения и токи для СУ и рассчитывают соответствующие симметричные составляющие. После чего согласно соотношениям находится входное сопротивление сети электроснабжения по выражению

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{\underline{E}_1 - \underline{U}_1}{\underline{I}_1}$$

или по выражению

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{\underline{E}_2 - \underline{U}_2}{\underline{I}_2}.$$

Таким образом, эти соотношения позволяют найти уточненное значение входного сопротивления на рассматриваемый момент времени.

Подчеркнем, что для управления работой СУ достаточно лишь измерять комплексные величины фазных напряжений и токов в месте его установки и далее по заданному алгоритму вычислять необходимые параметры этого устройства. При этом в процессе управления следует контролировать величину входного сопротивления сети по прямой последовательности относительно места установки СУ. Контроль этот

осуществляется единожды на межпоездном интервале, т.е. для БАМ не чаще, чем один раз за час.

Для регулирования параметров СУ в его структуре невозможно использование механических переключателей типа вакуумных или элегазовых выключателей. Действительно, коммутационный ресурс этих выключателей в течение их срока службы составляет $(10-40) \cdot 10^3$ коммутаций. В то время как при принятой скважности управления СУ количество переключений только в один год составит $60 \cdot 8760 \sim 500 \cdot 10^3$. Таким образом, регулирование параметров СУ должно осуществляться с использованием преобразовательной техники [87,88].

Современный уровень развития измерительной и вычислительной техники позволяет реализовать предлагаемый способ снижения несимметрии путем создания микропроцессорной системы автоматического управления (САУ) симметрирующим устройством, структурная схема которой приведена на рисунке 5.3.

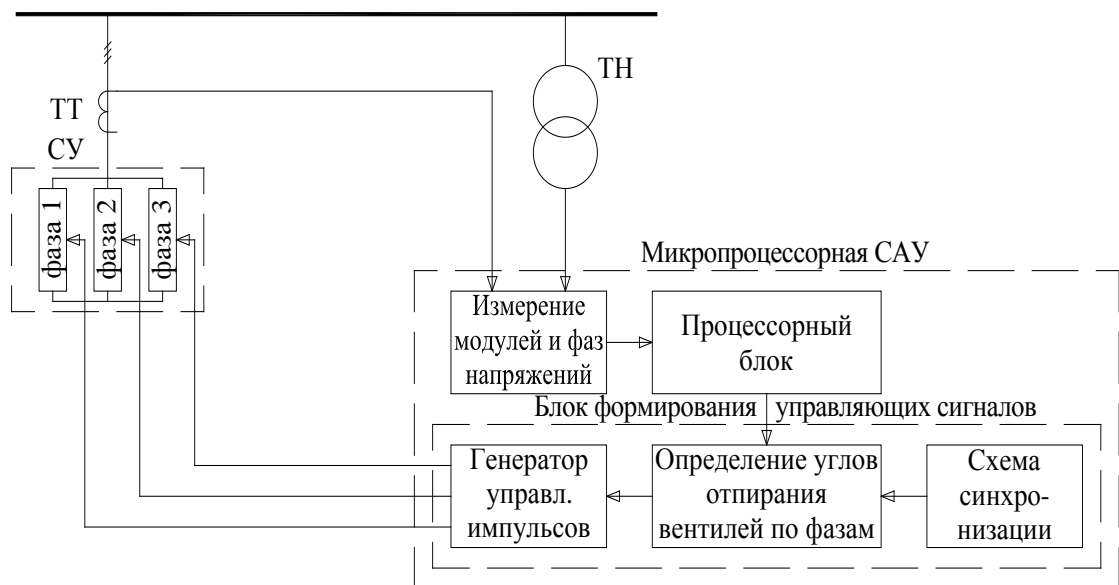


Рисунок 5.3 – Структурная схема микропроцессорной системы автоматического управления симметрирующим устройством

Схема микропроцессорной САУ включает в свой состав векторный регистратор, процессорный блок и блок формирования управляющих сигналов. Векторный регистратор [64], появившийся впервые за рубежом в 80-е годы прошлого столетия и называемый там как PMU (Phasor Measurement Unit), регистрирует не только модули фазных напряжений и токов, но фазовые углы, определяемый как углы между синусоидой измеряемой величины и синусоидой 50 Гц, привязанной к сигналам точного времени, получаемым от ГЛОНАС или GPS .

Процессорный блок выполняется на основе промышленной микропроцессорной элементной базы. Он осуществляет обработку цифровой информации, поступающей от векторного регистратора, согласно алгоритму, предложенному в предыдущей главе. В результате в блок формирования управляющих сигналов поступают данные о параметрах СУ (проводимостях отдельных фаз), обеспечивающих допустимый уровень несимметрии в СВЭ 220 кВ.

Блок формирования управляющих сигналов должен обеспечивать три основные функции. Первая функция состоит в синхронизации моментов открытия тиристорных вентилях. Эта функция обычно обеспечивается схемой фазовой синхронизации, которая работает в синхронизме с напряжением на шинах высокого напряжения и генерирует соответствующие импульсы относительно амплитуды напряжения.

Вторая функция состоит в определении углов отпирания тиристорных вентилях. Для этого используются соотношения между поступающими из процессорного блока проводимостями отдельных фаз и соответствующими им углами отпирания тиристорных вентилях.

Третья функция заключается в генерации управляющих импульсов. Она выполняется генератором импульсов, которые производят необходимые управляющие воздействия на тиристорные вентили независимо для каждой из фаз симметрирующего устройства.

В последующих подразделах даётся более детальное описание симметрирующих устройств, базирующихся на использовании либо тиристорно–реакторной группы (ТРГ), либо управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием (УШРП).

5.2 Управляемые симметрирующие устройства на базе тиристорно–реакторной группы

Схема управляемого СУ на базе тиристорно – реакторной группы и жестко подключённой конденсаторной батареи (КБ) показана на рисунке 5.4.

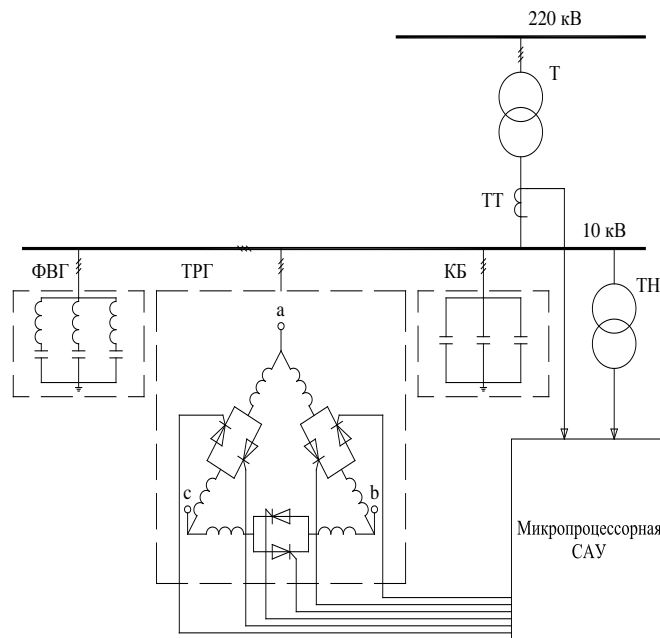


Рисунок 5.4 – Схема управляемого СУ на базе тиристорно - реакторной группы и некоммутируемой конденсаторной батареи.

Схема управляемого СУ включает также в свой состав фильтр высших гармоник и микропроцессорную САУ, описание которой было дано выше. В процессе управления предусматривается, чтобы проводимость СУ в каждой фазе могла изменяться в диапазоне

$$B_{\text{СУ}} = B_{L_{\text{max}}} \div B_{C_{\text{max}}}, \quad (5.1)$$

где $B_{L_{max}}$ – индуктивная проводимость при работе соответствующей фазы СУ в режиме максимального потребления; $B_{C_{max}}$ – ёмкостная проводимость при работе соответствующей фазы СУ в режиме максимальной выдачи.

Управление устройством симметрирования в указанном диапазоне осуществляется изменением индуктивной проводимости за счёт воздействия на угол отпирания тиристорных вентилей согласно соотношению

$$B_L(\alpha) = -(|B_{L_{max}}| + |B_{C_{max}}|) \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right), \quad (5.2)$$

где α – угол отпирания тиристорного вентиля.

Тогда соответственно для проводимости СУ в целом имеем

$$B_{cy}(\alpha) = B_{C_{max}} + B_L(\alpha) \quad (5.3)$$

На рисунке 5.5 показана зависимость фазной проводимости СУ от угла отпирания тиристорного вентиля, которая позволяет определить этот угол по информации о фазных проводимостях, рассчитываемых в процессорном блоке. В результате подаются соответствующие управляющие импульсы на вентили каждой фазы.

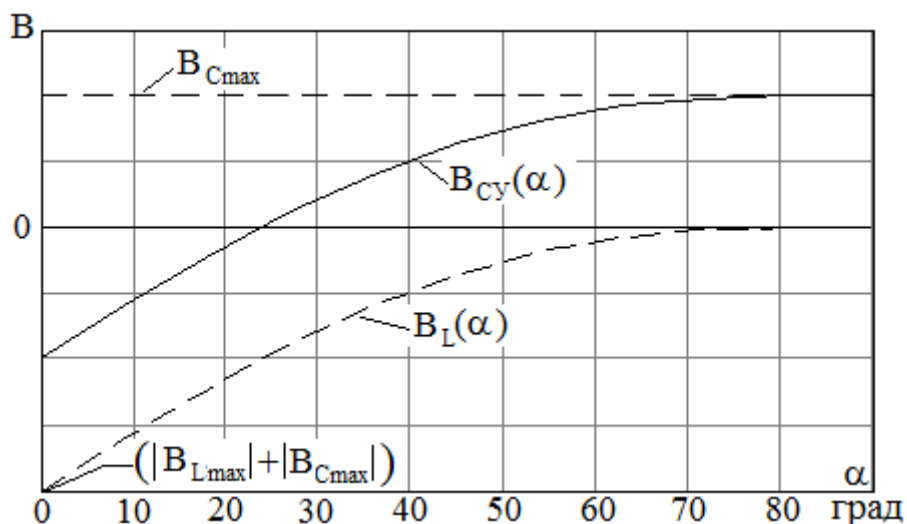


Рисунок 5.5 – Характер изменения проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от угла отпирания вентилей.

Недостатком рассмотренного регулируемого СУ является то обстоятельство, что мощность тиристорно–реакторной группы должна не только обеспечивать работу фаз СУ в индуктивном режиме, но и компенсировать мощность постоянно подключённой КБ. Избавиться от этого недостатка можно за счёт использования тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи, как это показано на рисунке 5.6

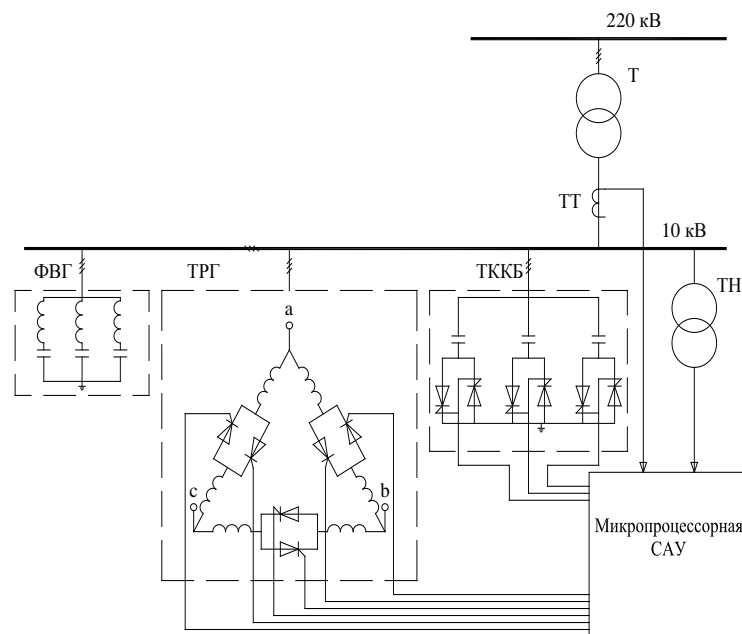


Рисунок 5.6 – Схема управляемого СУ на базе тиристорно– реакторной группы и тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи.

Характер управления СУ в этом случае (рисунок 5.7) определяется соотношением

$$B_{\text{СУ}}(\alpha) = \begin{cases} B_L(\alpha) & \text{при } B_C = 0, \\ B_{C_{\text{max}}} + B_L(\alpha) & \text{при } B_C = B_{C_{\text{max}}}. \end{cases} \quad (5.4)$$

При работе СУ в индуктивном режиме конденсаторная батарея находится в отключенном состоянии. При подключении КБ тиристорами симметрирующее устройство работает в ёмкостном режиме, и при этом управление ёмкостной проводимостью осуществляется путём изменения индуктивной проводимости тиристорно–реакторной группы за счёт регулирования угла отпирания тиристорov независимо для каждой фазы.

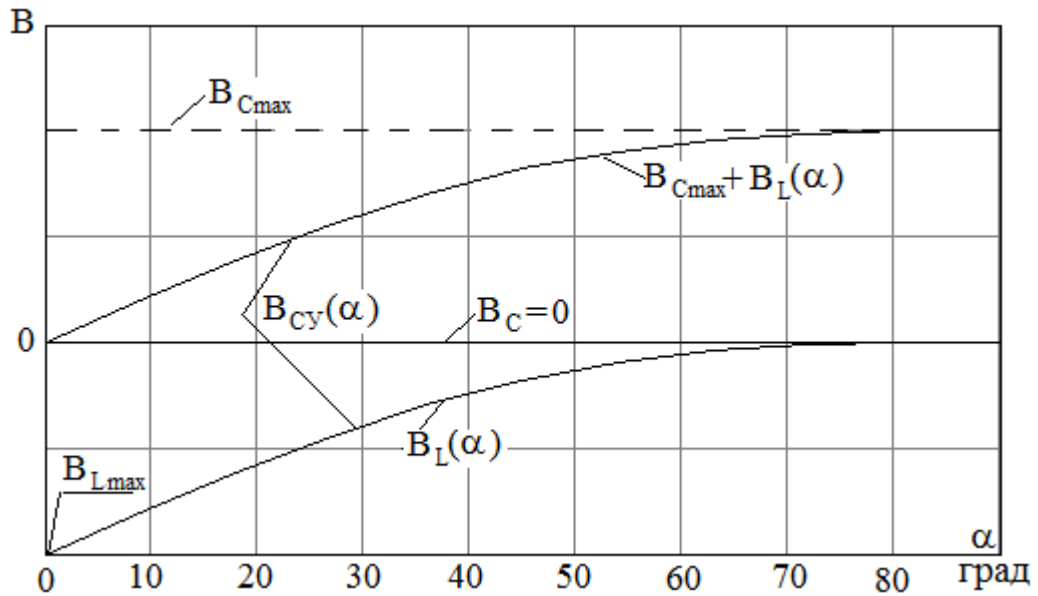


Рисунок 5.7 – Характер изменения проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от угла отпирания вентилей (вариант с тиристорно коммутируемой конденсаторной батареей).

5.3 Управляемые симметрирующие устройства на базе управляемых шунтирующих реакторов с подмагничиванием

Схема управляемого СУ на базе УШРП и жестко подключённой конденсаторной батареи (КБ) показана на рисунке 5.8. Основными элементами УШРП являются системная обмотка (СО), обмотка управления (ОУ) и полупроводниковый преобразователь (ПП), обеспечивающий необходимую регулируемую величину постоянного тока в обмотке управления. Кроме того в состав УШРП входит устройство коррекции формы тока (непоказанное на рисунке 5.8), представляющее трёхфазную батарею силовых конденсаторов. Это устройство обеспечивает фильтрацию гармоник холостого хода и сглаживание формы рабочего тока реактора. В начальный момент при токе управления равном нулю в реакторе протекает ток, вызванный ёмкостью устройства коррекции формы. Величина этого тока составляет (3–4) % номинального тока реактора [65]. При небольшом увеличении тока управления ёмкостная составляющая компенсируется и

соответственно дальнейший рост тока управления переводит УШРП на работу в индуктивном режиме.

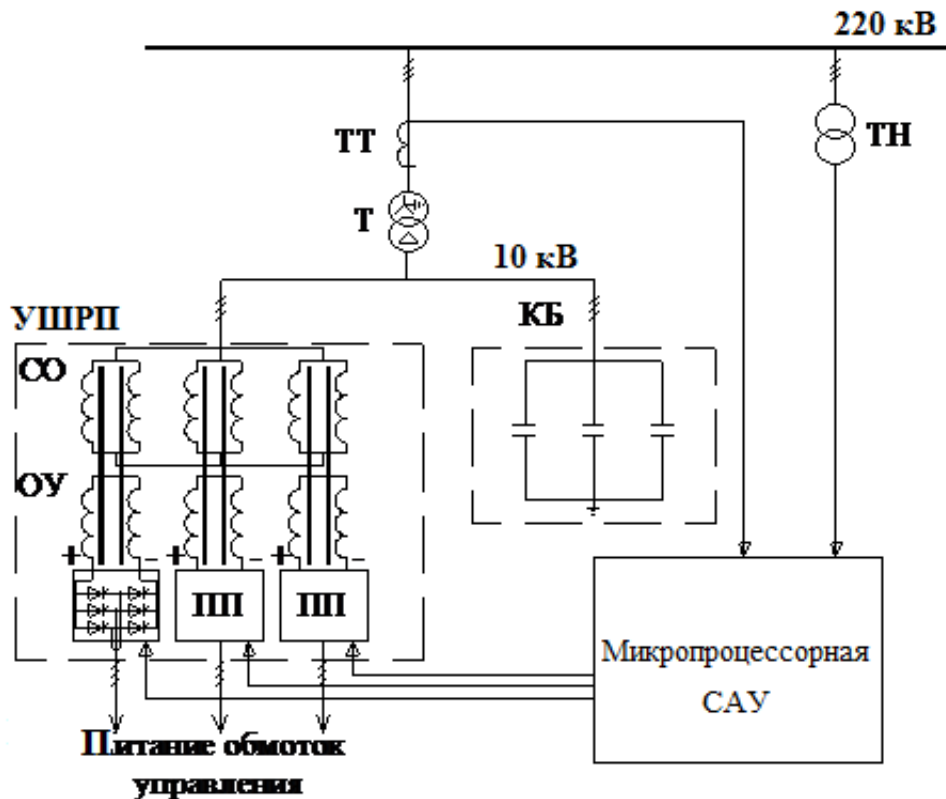


Рисунок 5.8 – Схема управляемого СУ на базе управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием и некоммутируемой конденсаторной батареей.

Как и в случае СУ на базе тиристорно-реакторной группы, проводимость СУ с использованием УШРП в процессе управления должна изменяться в каждой фазе в диапазоне, определяемом соотношением (5.1).

Управление устройством симметрирования в указанном диапазоне осуществляется изменением проводимости УШРП за счёт воздействия на ток обмотки управления согласно соотношению

$$B_L(i_y^*) = -(|B_{L_{\max}}| + |B_{C_{\max}}|)(i_y^* - 0,04), \quad (5.5)$$

где i_y^* - ток управления, отнесённый к его номинальной величине.

Соответственно проводимость СУ в целом определится как

$$B_{CY}(i_y^*) = B_{C_{\max}} + B_L(i_y^*). \quad (5.6)$$

На рисунке 5.9 показана зависимость фазной проводимости СУ от тока в обмотке управления, которая позволяет определить этот ток по информации о фазных проводимостях, рассчитываемых в процессорном блоке.

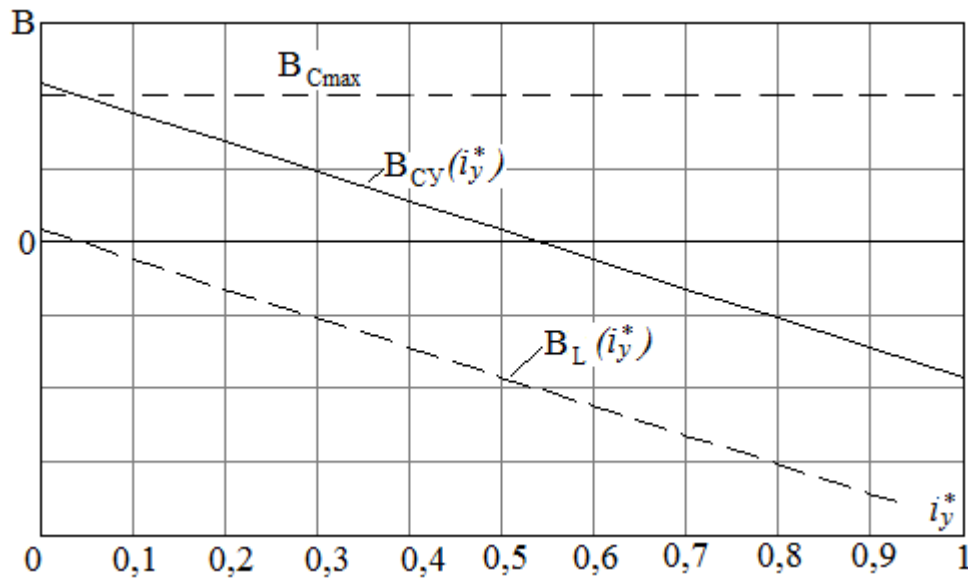


Рисунок 5.9 – Характер изменения проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от тока в обмотке управления.

Далее учитывается связь между током управления и углом отпирания тиристорных вентилях полупроводниковых преобразователей

$$i_y^* = i_y^*(\alpha) \quad (5.7)$$

Угол отпирания преобразователя меняется в диапазоне

$$\alpha_{xx} \leq \alpha \leq \alpha_n \quad (5.8)$$

где α_{xx} – угол отпирания при работе фазы УШРП в режиме холостого хода;
 α_n – угол отпирания при работе фазы УШРП в номинальном режиме.

В результате на основе соотношения (5.7) вырабатываются соответствующие управляющие импульсы, которые подаются на вентили преобразователей каждой фазы.

Недостатком рассмотренного регулируемого СУ, как и в случае СУ с тиристорно-реакторной группы и постоянно подключённой КБ, является

избыточная мощность УШРП, необходимая для компенсации мощности конденсаторной батареи.

Этот недостаток исключается за счёт использования тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи, как это показано на рисунке 5.10

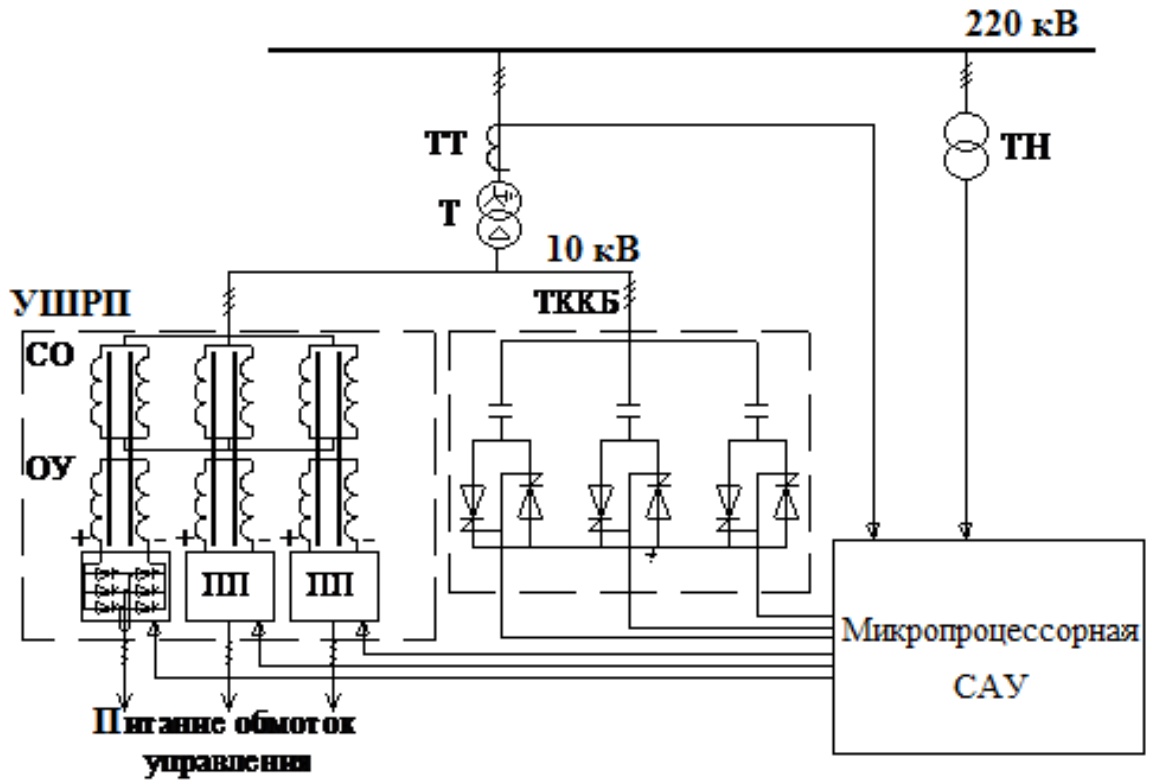


Рисунок 5.10 – Схема управляемого СУ на базе управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием и тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи.

Характер управления СУ в этом случае (рисунок 5.7) определяется выражением

$$B_{\text{СУ}}(i_y^*) = \begin{cases} B_L(i_y^*) & \text{при } B_C = 0, \\ B_{C_{\text{max}}} + B_L(i_y^*) & \text{при } B_C = B_{C_{\text{max}}}. \end{cases} \quad (5.9)$$

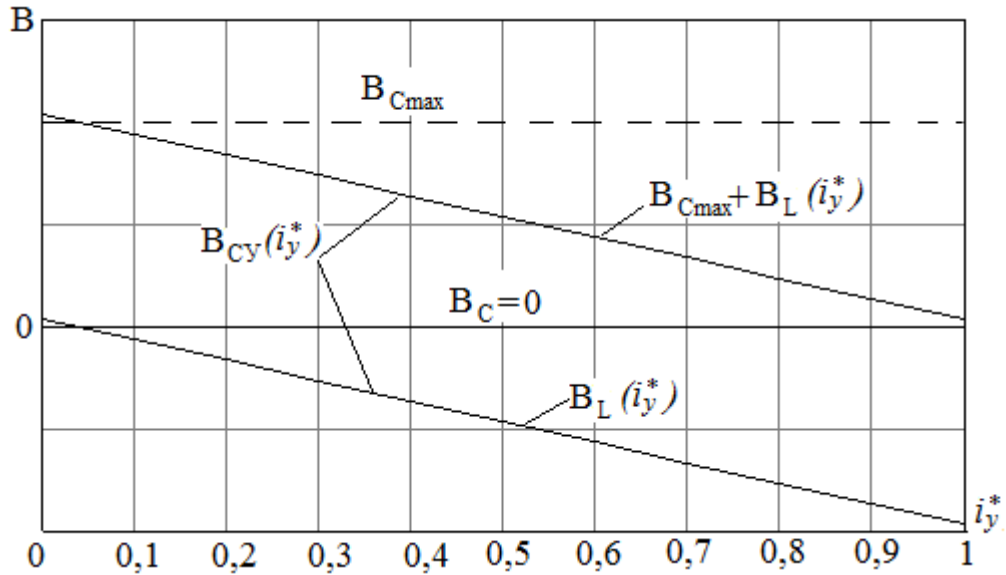


Рисунок 5.11 – Зависимость проводимости СУ в регулируемых фазах в зависимости от тока в обмотке управления (вариант с тиристорно коммутируемой конденсаторной батареей).

При работе СУ в индуктивном режиме конденсаторная батарея находится в отключенном состоянии. При подключении КБ тиристорами симметрирующее устройство работает в ёмкостном режиме, и при этом управление ёмкостной проводимостью осуществляется путём изменения индуктивной проводимости УШРП за счёт регулирования тока в обмотке управления путём воздействия на угол отпирания тиристорных вентилей полупроводниковых преобразователей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований решён вопрос снижения несимметрии в протяжённой сети 220-500 кВ, питающей тяговую нагрузку. Предложенный алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства и рекомендации по системам автоматического управления симметрирующим устройством позволяют повысить качество электроэнергии в протяжённых сетях электроснабжения железных дорог.

Основные результаты теоретического плана:

1. Разработана методика расчета несимметрии в протяженной высоковольтной сети, включающая матричные модели в фазных координатах всех элементов сети, способы эквивалентирования и преобразования отдельных участков сети, а также расчетный алгоритм, основанный на линеаризации тяговой нагрузки.

2. Предложен метод определения пофазных параметров симметрирующих устройств, которые в общем случае зависят от нескольких режимных параметров, а также от схемы протяженной сети с распределенной тяговой нагрузки. Разработанный метод основывается на использовании комплексных величин фазных напряжений и токов в месте установки симметрирующих устройств при учете остальной сети обобщенным режимным параметром, который при необходимости может корректироваться.

3. Обоснован алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства на межпоездном интервале, где несимметрия заметно меняется с дискретностью порядка одной минуты. Предлагаемый алгоритм управления параметрами симметрирующего устройства включает следующую последовательность действий: замер фазных напряжений и токов на зажимах симметрирующего устройства и расчет коэффициента несимметрии; сравнение коэффициента несимметрии с его пороговым значением и

определение параметров симметрирующего устройства, которые обеспечивают полную компенсацию напряжения обратной последовательности. В процессе управления контролируется величина входного сопротивления сети по прямой последовательности относительно места установки симметрирующего устройства. Контроль осуществляется единожды на межпоездном интервале, для БАМ не чаще, чем один раз за час.

Основные результаты практического плана:

1. Результаты анализа режимов работы сети внешнего электроснабжения 220-500 кВ БАМ, показавшие, что уровень несимметрии, обусловленный пофазно различной тяговой нагрузкой, значительно превосходит допустимый уровень, что диктует необходимость использования симметрирующих устройств для устранения недопустимой несимметрии.

2. Предложения по выбору типа и параметров симметрирующих устройств. Для управления параметрами симметрирующего устройства в его структуре невозможно использование механических переключателей типа вакуумных или элегазовых выключателей, поскольку их коммутационный ресурс в течение срока службы недостаточен для этой цели. Регулирование параметров симметрирующего устройства должно осуществляться с использованием преобразовательной техники, что может быть обеспечено путем применения либо статических тиристорных компенсаторов в совокупности с тиристорно коммутируемой конденсаторной батареей либо управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием, оснащенного также тиристорно коммутируемой конденсаторной батареей.

3. Рекомендации по созданию микропроцессорных систем автоматического управления симметрирующими устройствами на базе статических тиристорных компенсаторов и с использованием управляемых шунтирующих реакторов с подмагничиванием, которые могут быть использованы при проведении НИР и ОКР по разработке опытно-промышленных образцов симметрирующих устройств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Закарюкин, В.П. Снижение несимметрии в электрических сетях, питающих тяговые подстанции железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017 Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 146-149.
2. Закарюкин, В.П. Моделирование и параметрическая идентификация узлов нагрузки электроэнергетических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, К.З. Ле. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2016. – 158 с.
3. Закарюкин В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения, оснащенных симметрирующими устройствами / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. №4-2. С. 70-79.
4. Закарюкин, В.П. Управление качеством электроэнергии в системах электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.В. Черепанов. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2015. – 180 с.
5. Закарюкин, В.П. Идентификация параметров двухцепной линии электропередачи в фазных координатах / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, А.А. Кушов // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2015. №4(61). С. 140-151.
6. Закарюкин, В.П. Моделирование систем тягового электроснабжения с симметрирующими трансформаторами / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.М. Авдиенко // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2015. Т. 1. С. 599-603.
7. Закарюкин, В.П. Моделирование режимов систем электроснабжения железных дорог / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2014. – 164 с.

8. Закарюкин, В.П. Анализ схем симметрирования тяговых нагрузок железных дорог переменного тока / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Е.С. Иванова // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4(20). С. 68-73.

9. Закарюкин, В.П. Электромагнитная обстановка на объектах железнодорожного транспорта / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Н.В. Буюкова. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2012. – 84 с.

10. Закарюкин, В.П. Моделирование и управление в системах тягового электроснабжения / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, С.М. Астахин // Исследовано в России. 2008. № 006. С. 68.

11. Закарюкин, В.П. Проблемы электроснабжения Байкало-Амурской железнодорожной магистрали и возможности их решения / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, Н.И. Молин // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 15. С. 111-114.

12. Закарюкин, В.П. Определение предельных режимов энергосистем с учетом несимметрии в электрической сети / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, М.К. Сальникова, А.М. Степкин // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2006. Т. 2. С. 29-37.

13. Закарюкин, В.П. Сложнонесимметричные режимы электрических систем / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2005. – 273 с.

14. Крюков, А.В. Улучшение качества электроэнергии в сетях 110-220 кВ, питающих тяговые подстанции / А.В. Крюков, А.П. Куцый, А.В. Черепанов // Электроэнергетика глазами молодежи - 2017 Материалы VIII Международной научно-технической конференции. 2017. С. 318-321.

15. Крюков, А.В. Управление электромагнитной обстановкой в тяговых сетях железных дорог / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин, Н.В. Буюкова. – Ангарск: Ангарская государственная техническая академия, 2015. – 158 с.

16. Крюков, А.В. Линеаризованные эквивалентные модели питающей сети для расчетов режимов систем тягового электроснабжения // А.В.

Крюков, Д.П. Вторушин // Транспортная инфраструктура Сибирского региона. 2013. Т. 2. С. 38-42.

17. Крюков, А.В. Компьютерные технологии для моделирования систем электроснабжения железных дорог переменного тока / А.В. Крюков, В.П. Закарюкин // Транспорт Российской Федерации. 2010. № 3(28). С. 61-65.

18. Минина, А.А. Обеспечение качества электроэнергии в системах тягового электроснабжения переменного тока / А.А. Минина, В.И. Пантелеев, Е.В. Платонова // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2012. Т. 5. № 3. С. 319-326.

19. Пантелеев, В.И. Модернизация систем тягового электроснабжения переменного тока / В.И. Пантелеев, А.Г. Машкин, П.Ю. Лукьянов // Энергетик. 2011. № 7. С. 13-14.

20. Машкин, А.Г. Симметрирования нагрузки тяговых трансформаторов / А.Г. Машкин, В.И. Пантелеев // Промышленная энергетика. 2006. № 3. С. 30-32.

21. Рогов, Г.В. Применение преобразователей напряжения для повышения качества электроэнергии в системах внешнего электроснабжения железных дорог / Г.В. Рогов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. №2. С. 261-264.

22. Рогов, Г.В. Моделирование установившихся режимов электрических систем с учетом устройств симметрирования напряжения / Г.В. Рогов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. №1(37). С.111-115.

23. Рогов, Г.В. Комплексное повышение качества электроэнергии в сложных сетях / Г.В. Рогов // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т.322, №4. С. 77-81.

24. Рогов, Г.В. Активный кондиционер напряжения как средство повышения качества электроэнергии / Г.В. Рогов // Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах: тез. Докл. Междунар.

Молодежной науч.-техн. конф., г. Новосибирск, 21-24 сент. 2011 г. – Новосибирск: изд-во НГТУ, 2011. С.52.

25. Грубер, Л.О. Электрические станции и тяговые подстанции / Л.О. Грубер, С.Н. Засорин, Л.М. Перцовский. - М.: Транспорт, 1964. – 423 с.

26. Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог: учебник для вузов / К.Г. Марквардт. - М.: Транспорт, 1982. - 528 с.

27. Войтов, О.Н. Режимы внешнего электроснабжения магистрали Лена-Северобайкальск –Таксимо при перспективных размерах движения / О.Н. Войтов, А.В. Крюков, М.Л. Дмитриева // Новые технологии управления и методы анализа электрических систем и систем тягового электроснабжения. Иркутск, 2000. С. 88-105.

28. Войтов, О.Н. Повышение надежности электроснабжения западного участка Байкало-Амурской железнодорожной магистрали / О.Н. Войтов, А.В. Крюков // Энергосистема: управление, качество, безопасность. 2001. С. 199-203.

29. Шидловский, А.К. Повышение качества электрической энергии в электрических сетях / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1983. – 268 с.

30. Шидловский, А.К. Повышение качества электрической энергии в распределительных сетях с несимметричными нагрузками / А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов // Проблемы технической электродинамики: Респ. Межведомственный сборник. 1976. Вып. 59. С. 3-14.

31. Гриб, О.Г. Контроль и регулирование несимметричных режимов в системах электроснабжения / О.Г. Гриб. - Харьков: ХНАГХ, 2004. - 180 с.

32. Анохин, Б.А. Анализ уровней несимметрии и отклонений напряжения в протяженной сети при питании тяговой нагрузки / Б.А. Анохин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2012. № 1. С. 404-407.

33. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

34. Вольдек, А.И. Электрические машины: учебник / А.И. Вольдек —Л.: Энергия, 1978. - 834 с.

35. Токарев, Б.В. Электрические машины: учеб. пособие для вузов. / Б.В. Токарев — М.: Энергоатомиздат, 1990. - 672 с.

36. Хуторецкий, Г.М. Проектирование турбогенераторов / Г.М. Хуторецкий, М.И. Токов, Е.В. Толвинская. - Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 256 с.

37. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети: учебник для вузов / В.И. Идельчик. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.

38. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические вопросы. Том1: Электрические подстанции переменного тока / под общей редакцией А.Ф. Дьякова. – М: НТФ «Энергопрогресс» Корпорация «ЕЭЭК», 2012. – 668 с.

39. РД-34.45.501-88 Типовая инструкция по эксплуатации генераторов на электростанциях. - М: СПО Союзтехэнерго, 1989.

40. СО 153-34.20.501-2003 Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации

41. Чернин, А.Б. Основы вычислений электрических величин для релейной защиты при сложных повреждениях в электрических системах / А.Б. Чернин, С.Б. Лосев. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 526 с.

42. Лосев, С.Б. Вычисление электрических величин в несимметричных режимах электрических систем / С.Б. Лосев, А.Б. Чернин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. –528 с.

43. Лосев, С.Б. Об использовании фазных координат при расчете сложннесимметричных режимов / С.Б. Лосев // Электричество. 1979. №1. С. 15 – 23.

44. Берман, А.П. Расчет несимметричных режимов электрических систем с использованием фазных координат / А.П. Берман // Электричество. 1985. №12. С. 6 – 12.
45. Гусейнов, А.М. Расчет в фазных координатах несимметричных установившихся режимов в сложных системах / А.М. Гусейнов // Электричество. – 1989. №3. С 1-7.
46. Lyon ,W. Applications of The Method of Symmetrical components / W. Lyon. - New York: McGraw-Hill, 1937. - 285 p.
47. Laughton M. A. Analysis of unbalanced polyphase networks by the method of phase coordinates. Part 1. System representation in phase frame of reference // Proc. IEEE, 1968, v. 115, № 8, pp. 1163–1172.
48. Wagner, C.F. Symmetrical components/ C.F. Wagner, R.D. Evans -New York: McGraw-Hill, 1933. - 258 p.
49. Нейман, Л.Р. Теоретические основы электротехники. Часть 2 / Л.Р. Нейман, П.Л. Калантаров. – М: Госэнергоиздат, 1959. – 730 с.
50. Мисриханов, М.Ш. Повышение эффективности расчетов установившихся несимметричных режимов / М.Ш. Мисриханов, А.А. Рагозин, В.А. Попов, Р.В. Медов // Тр. ИГЭУ. 2001. Вып.4. – С. 193-200.
51. Рагозин, А.А. Моделирование электроэнергетических систем при решении задач несимметричных режимов / А.А. Рагозин, М.Ш. Мисриханов, В.А. Попов, Н.Н. Якимчук, Р.В. Медов // Тр. ИГЭУ. 2001. Вып.4. – С. 51-62.
52. Лосев, С.Б. Разработка методических указаний по расчету сложно-несимметричных режимов в сетях 110-750 кВ: Отчет о НИР /С.Б. Лосев, И.И. Офицерова. - М.: Энергосетьпроект, 1981.
53. Красильникова, Т.Г. Анализ несимметричных режимов в дальних электропередачах в фазных координатах / Т.Г. Красильникова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. №2. С. 223-226.
54. Чернин, А.Б. Вычисление электрических величин и поведение релейной защиты при неполнофазных режимах в электрических системах. / А.Б Чернин. - М.: Госэнергоиздат, 1963. – 416 с.

55. Заславская, Т.Б. Алгоритмы расчета в фазных координатах сети большого объема / Т.Б. Заславская // Труды СибНИИЭ. 1972. Вып.23. С. 66-74.

56. Гершенгорн, А.И. Целесообразность применения транспозиции на линиях высокого напряжения. / А.И. Гершенгорн // Труды института Энергосетьпроект. 1970. Вып.1. - С. 143-154.

57. Гершенгорн, А.И. Несимметрия токов и напряжений в электрических системах, содержащих линии 750 кВ / А.И. Гершенгорн, З.Б. Голембо // Сб. статей Дальние электропередачи 750 кВ. Часть 1. М.: Энергия, 1974. Вып.1.

58. Красильникова, Т.Г. Оценка уровней несимметрии в нормальных режимах настроенной ЭП Сибирь-Урал / Т.Г. Красильникова // Передача энергии переменным током на дальние и сверхдальние расстояния: материалы международной науч.-техн. конф. – Новосибирск, 2003. – Т. 1. С.113-117.

59. Предпроектное исследование по титулу «Установка устройств компенсации реактивной мощности в сети 220 кВ БАМ». Разработка базовой математической модели электроснабжения БАМ. Этап № 1 Книга № 1 «Предварительный анализ условий несимметрии и несинусоидальности в сети 220 кВ» 2010 г, филиал АО «НТЦ ФСК ЕЭС» СибНИИЭ.

60. Герасимов, А. С. Моделирование вставки постоянного тока на преобразователях напряжения в среде ПВК «EUROSTAG» / А.С. Герасимов, Е.В. Ефимова, А.В. Коробков, В.А. Шлайфштейн // Известия НИИ постоянного тока. 2010. № 64. С. 223–234.

61. Mashedjian, J. Simulation tools for electromagnetic transients in power Systems: Overview and Challenges / Mashedjian J., Dinavahi V., Martines J. // IEEE Transactions on Power Delivery. - Vol. 24, No. 3, July 2009.- p. 1657-1669.

62. Закарюкин, В.П. Имитационное моделирование систем тягового электроснабжения / В.П. Закарюкин, А.В. Крюков. – Иркутск: Иркутский государственный университет путей сообщения, 2007. – 124 с.

63. Красильникова, Т.Г. Исследование схем транспозиции дальних и сверхдальних линий электропередачи: диссертация на соискание ученой степени к.т.н / Т.Г. Красильникова. – Новосибирск: НГТУ, 2005 г.

64. Анохин, Б.А. Анализ расположения фаз двухцепной линии на основе уравнений в фазных координатах / Б.А. Анохин // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. №1. С. 296-300.

65. Анохин, Б.А. Матричные модели протяженных сетей для расчета несимметричных режимов / Б.А. Анохин, Т.Г. Красильникова // Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах: тез. Докл. Междунар. Молодежной науч.-техн. конф., г. Новосибирск, 21-24 сент. 2011. - Новосибирск: изд-во НГТУ, 2011.

66. Мельников, Н.А. Использование матричного метода при исследовании режимов электрических сетей / Н.А. Мельников // Тр. ВНИИЭ. 1965. т. XXII. С. 168-184.

67. Беллман, Р. Введение в теорию матриц / Р. Беллман. - М.: Изд. Наука, 1969. - 367 с.

68. Анохин, Б.А. Определение параметров симметрирующего устройства для устранения несимметрии напряжений в протяженной сети питающей несимметричную нагрузку / Б.А. Анохин, Т.Г. Красильникова // Сб. науч. тр. НГТУ. 2012. Вып. 4. С. 145 - 152.

69. Костенко, М.В., Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. - М.: Энергия, 1973. –272 с.

70. Зевеке, Г.В. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

71. Жежеленко, И.В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 168 с.

72. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы: Сб. статей / под ред. А.М. Брянцева. - М.: Знак, 2004. - 274 с.

73. Александров, Г.Н. Принципы работы управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа/ Г.Н. Александров, Б.И. Альбертинский, И.А. Шкуропат //Электротехника. 1995. №11. С. 30-34.

74. Bryantsev, A. Magnatically controlled shunt reactor application for AC HV and EHV transmission lines/ A. Bryantsev, V.Dorofeev [et. al] // CIGRE Session 2006. SC B4 HVDC and Power Electronics (B4-307).

75. Кадомская, К.П., Математическое моделирование и эффективность управляемых шунтирующих реакторов высокого напряжения / К.П. Кадомская, Г.Г. Михайловский // Энергоэксперт. 2009. №6. С. 40-46.

76. Кочкин В.И., Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий / В.И. Кочкин, О.П. Нечаев. – М.: НЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.

77. Дементьев, Ю.А. Применение управляемых статических компенсирующих устройств в электрических сетях / Ю.А. Дементьев, В.И. Кочкин, А.Г. Мельников //Электричество. 2003. №9. С. 2-10.

78. Крысанов В.Н. О возможности применения тиристорного регулятора напряжения в электрических сетях класса 6 – 1150 кВ /В.Н. Крысанов // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 2. С. 9–12.

79. Hingorani, N.G. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible ac Transmission Systems/ N.G. Hingorani and L.Gyugyi. - IEEE Press, NJ, 2000. – 432 p.

80. Милях, А.Н., Симметрирование однофазных нагрузок в трехфазных цепях / А.Н. Милях, А.К. Шидловский, В.Г. Кузнецов. – К.: Наукова думка, 1973. - 219 с.

81. Шидловский, А.К. Симметрирование режимов многофазной системы при питании однофазных нагрузок / А.К. Шидловский // Проблемы техн. электродинамики. 1970. Вып. 24. С. 55-61.

82. Шидловский, А.К. Симметрирование однофазных и двухплечевых электротехнологических установок / А.К. Шидловский, Б.П. Борисов. – К.: Наукова думка, 1977. - 159 с.

83. Шидловский, А.К. Параметрическое устройство для симметрирования трехфазных напряжений / А.К. Шидловский, А.Д. Музыченко, А.П. Трофименко // Проблемы техн. электродинамики. 1979. Вып. 69. С. 3-5.

84 Анохин, Б.А. Схемы управления симметрирующими устройствами в сети внешнего электроснабжения железных дорог / Б.А. Анохин, Т.Г. Красильникова // Научный вестник НГТУ. 2013. Вып. 2. С. 168 – 177.

85. Крысанов, В.Н. Симметрирование напряжения в электрических сетях / В.Н. Крысанов // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008 №4.

86. Дмитриев, М.В. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы / М. В. Дмитриев [и. д.р.] - СПб.: Родная Ладога, 2013. - 280 с.

87. Phadke, A.G. A New Measument Technique of Tracking Voltage Phasors, Local System Frequen and Rate of Change of Frequency / A.G.Phadke, J.S. Thopke and M.G.Adamiak // IEEE Transactions on Power Apparaters and Systems, Vol.PAS-102, No.5,May 1983

88. Бурбело, М.И. Управление симметрирующими устройствами при многократной несимметрии нагрузок в распределительной электрической сети / М.И. Бурбело, М.В. Девятко, Ю.П. Войтюк // Научные труды ВНТУ. . 2012. №2. С. 1-5.

ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ДЛЯ УЧАСТКА СЕТИ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

Расчет параметров симметрирующего устройства для сети с нелинейными нагрузками. Для примера взята схема с четырьмя узлами, с несимметричными нагрузками и несимметричным источником.

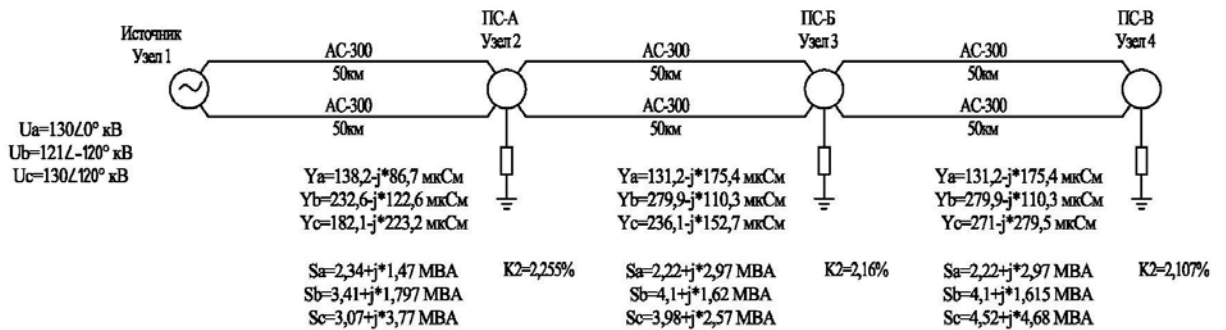


Рисунок А.1 - Первый этап

1 этап. На первом этапе выполнен расчет начального режима схемы. Определены напряжения в узлах, коэффициенты несимметрии, а также определены мощности нагрузок, которые на последующих этапах расчета будут неизменными.

2 этап. По методу, изложенному в диссертационной работе, выбраны параметры симметрирующего устройства для данной схемы, при заданных на первом этапе проводимостях нагрузки. Далее проведен расчет параметров схемы с подключенным СУ (напряжения, коэффициенты несимметрии).

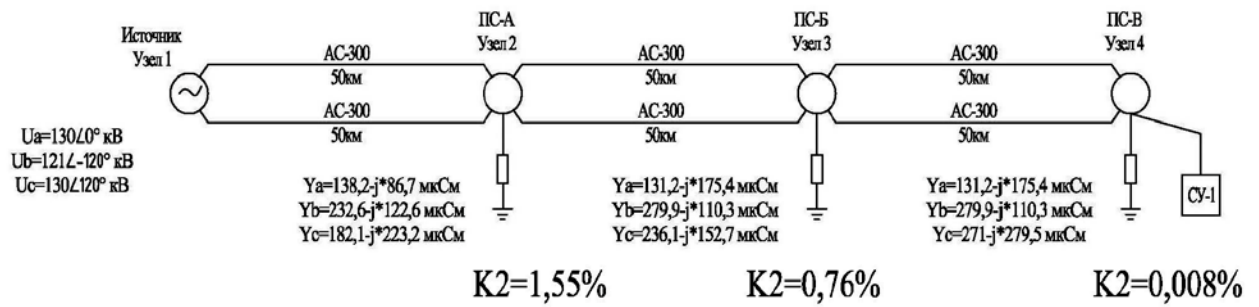


Рисунок А.2 - Второй этап

3 Этап. По полученным на втором этапе напряжениям, выполнен пересчет проводимостей нагрузок и расчет параметров схемы с уточненными значениями проводимостей.

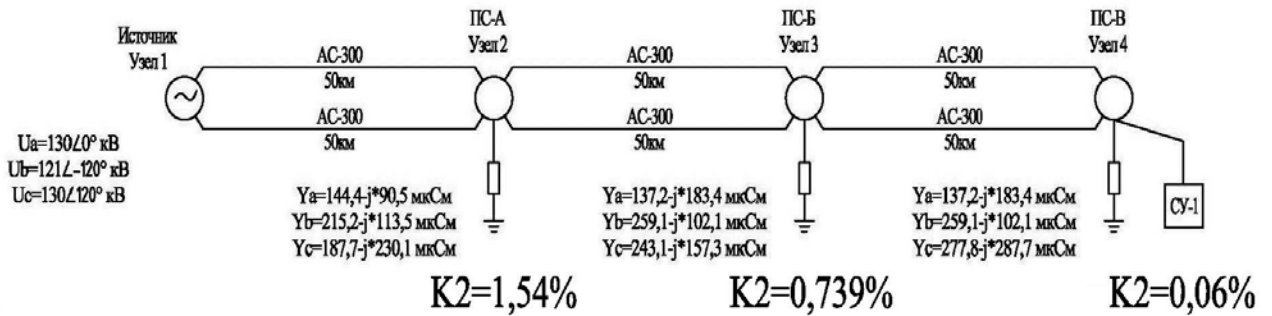


Рисунок А.3 - Третий этап

4 Этап. По полученным на третьем этапе напряжениям, выполнен пересчет проводимостей нагрузок и расчет параметров схемы с уточненными значениями проводимостей.

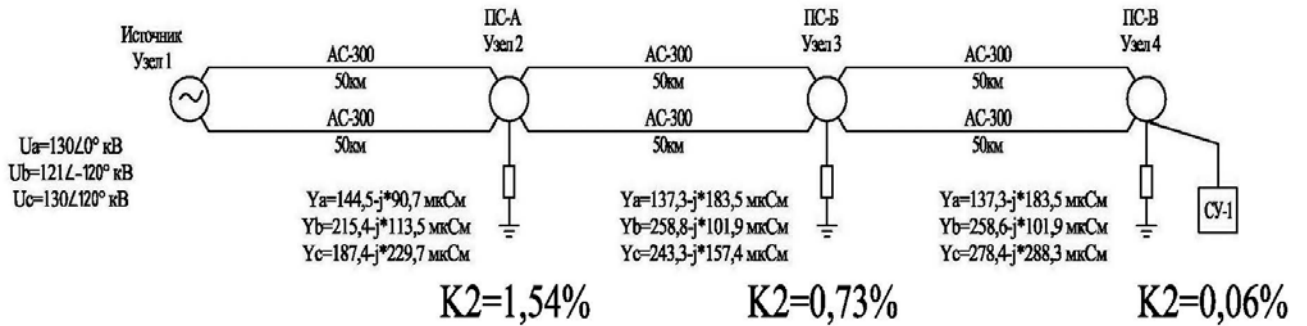


Рисунок А.4 - Четвертый этап

Таблица А.1 - Сравнение результатов расчета на линейной и нелинейной модели

Расчетная схема	Узел 2	Узел 3	Узел 4
Коэффициент несимметрии до подключения СУ	2,25	2,16	2,107
Коэффициент несимметрии с СУ для линейной модели	1,55	0,76	0,0008
Коэффициент несимметрии с СУ для нелинейной модели (2 итерации)	1,54	0,73	0,06

Коэффициенты несимметрии остаются в пределах нормы как для линейной, так и для нелинейной модели. Погрешность расчета несимметрии на линейной модели незначительна. Предложенный в работе метод определения параметров симметрирующего устройства корректно работает на нелинейной модели протяженной сети с нагрузками по величине близкими к нагрузкам тяговых подстанций сетей внешнего электроснабжения железных дорог.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ «РАСЧЕТ
НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА» ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ
КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ПРОТЯЖЕННОЙ ТРЕХФАЗНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ И
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СИММЕТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ**

Программа, позволяющая реализовать описанную в работе методику, написана в среде MatLab. Программа позволяет пофазно рассчитать напряжения во всех узлах схемы, определить коэффициенты несимметрии, определить параметры симметрирующего устройства. Расчет выполняется в фазных координатах. Программа для удобства применения поделена на основную часть и дополнительные модули.

В настоящее время поданы документы на государственную регистрацию данной программы в Роспатент.

Основная часть программы составляется под конкретную схему сети. В работе была составлена основная часть для расчета режима в западной и восточной частях сети внешнего электроснабжения 500-220 кВ БАМ, с учетом возможного раздела в трех разных точках (ПС 220 кВ Таксимо, ПС 220 кВ Северобайкальск, ПС 220 кВ Уоян) Схема сети внешнего электроснабжения БАМ приведена на рисунке Б.1.

Так называемые дополнительные модули используются при составлении основной части при выполнении определенных повторяющихся операций и позволяют значительно ускорить процесс составления основной части программы под конкретную схему. В программе используются следующие дополнительные модули:

- Расчет М-матрицы двухцепной транспонированной линии (Mmatrix);
- расчет М-матрицы одноцепной транспонированной линии (Mmatrix3);
- расчет М-матрицы двухцепной нетранспонированной линии (Line220kV);
- расчет М-матрицы одноцепной нетранспонированной линии (Line220kVsingle);
- расчет М-матрицы одноцепного эквивалента двухцепного участка с учетом взаимной связи цепей (equal);
- расчет М-матрицы одноцепного эквивалента двухцепного участка без учета взаимной связи цепей (equal2);
- расчет эквивалентных М-матрицы и Е-матрицы (напряжений) эквивалентного источника (equaE1E2);
- расчет приведенной матрицы М к виду UU , для расчета токов в начале и конце участка по известным напряжениям по концам (MatrixMuu);
- расчет параметров компенсирующего устройства (ParametrKU);
- расчет параметров симметрирующего устройства (ParametrSU);
- расчет М-матрицы силового трехфазного трехобмоточного трансформатора (Transformer3);
- расчет значений показателей качества электроэнергии в узле (Rezult).

Далее приведено краткое описание некоторых дополнительных модулей программы:

Расчет М-матрицы двухцепной транспонированной линии (Mmatrix)

Модуль позволяет получить общую М-матрицу двухцепной транспонированной линии (рисунок Б.2) в фазных координатах размерностью 12x12.

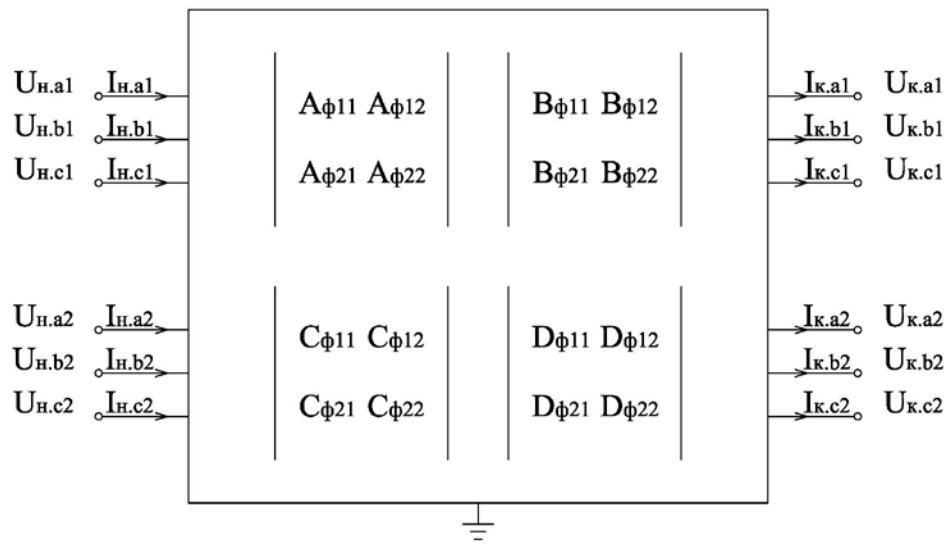


Рисунок Б.2 – матричная модель двухцепной линии

$$M_{12} = \begin{pmatrix} A_6 & B_6 \\ C_6 & D_6 \end{pmatrix}$$

Входные параметры:

ZWM – матрица волновых сопротивлений линии относительно симметричных составляющих размерностью 6;

GammaM – матрица коэффициентов распространения относительно симметричных составляющих размерностью 6;

L – длина линии, км.

Выходные параметры:

M – общая матрица элемента 12x12.

Расчет М-матрицы одноцепной транспонированной линии (Mmatrix3).

Модуль позволяет получить общую М-матрицу двухцепной транспонированной линии (рисунок Б.3) в фазных координатах размерностью 6х6.

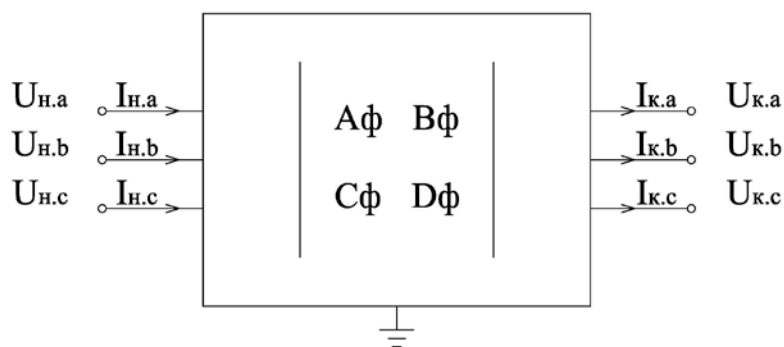


Рисунок Б.3 – матричная модель одноцепной линии

$$M_6 = \begin{pmatrix} A_3 & B_3 \\ C_3 & D_3 \end{pmatrix}$$

Входные параметры:

ZWM – матрица волновых сопротивлений линии относительно симметричных составляющих размерностью 3;

GammaM – матрица коэффициентов распространения относительно симметричных составляющих размерностью 3;

L – длина линии, км.

Выходные параметры:

M6 – общая матрица элемента 6х6.

Расчет М-матрицы двухцепной нетранспонированной линии (Line220kV).

Модуль позволяет получить общую М-матрицу двухцепной нетранспонированной линии (рисунок Б.2) в фазных координатах размерностью 12x12.

Входные параметры:

$h_{1L} h_{1R} h_{2L} h_{2R} h_{3L} h_{3R}$ – высоты подвеса проводов 1,2,3 левой L и правой R цепей, м;

$a_{1L} a_{1R} a_{2L} a_{2R} a_{3L} a_{3R}$ – расстояния от оси опоры до проводов 1,2,3 левой L и правой R цепей, м;

L – длина линии, км.

R_{pr} – удельное электрическое сопротивление провода постоянному току Ом/км;

Выходные параметры:

M – общая матрица элемента 12x12.

Расчет М-матрицы одноцепной нетранспонированной линии (Line220kVsingle)

Модуль позволяет получить общую М-матрицу одноцепной нетранспонированной линии (рисунок Б.3) в фазных координатах размерностью 6x6.

Входные параметры:

$h_1 h_2 h_3$ – высоты подвеса проводов 1,2,3, м;

$a_1 a_2 a_3$ – расстояния от оси опоры до проводов 1,2,3, м;

L – длина линии, км.

R_{pr} – удельное электрическое сопротивление провода постоянному току Ом/км;

Выходные параметры:

M₆ – общая матрица элемента 6x6.

Расчет M-матрицы одноцепного эквивалента двухцепного участка с учетом взаимной связи цепей (equal)

Модуль позволяет получить эквивалентную общую матрицу двухцепного участка (с учетом взаимных связей цепей) размерностью 6х6 на основе исходной общей матрицы размерностью 12х12 (рисунок Б.4).

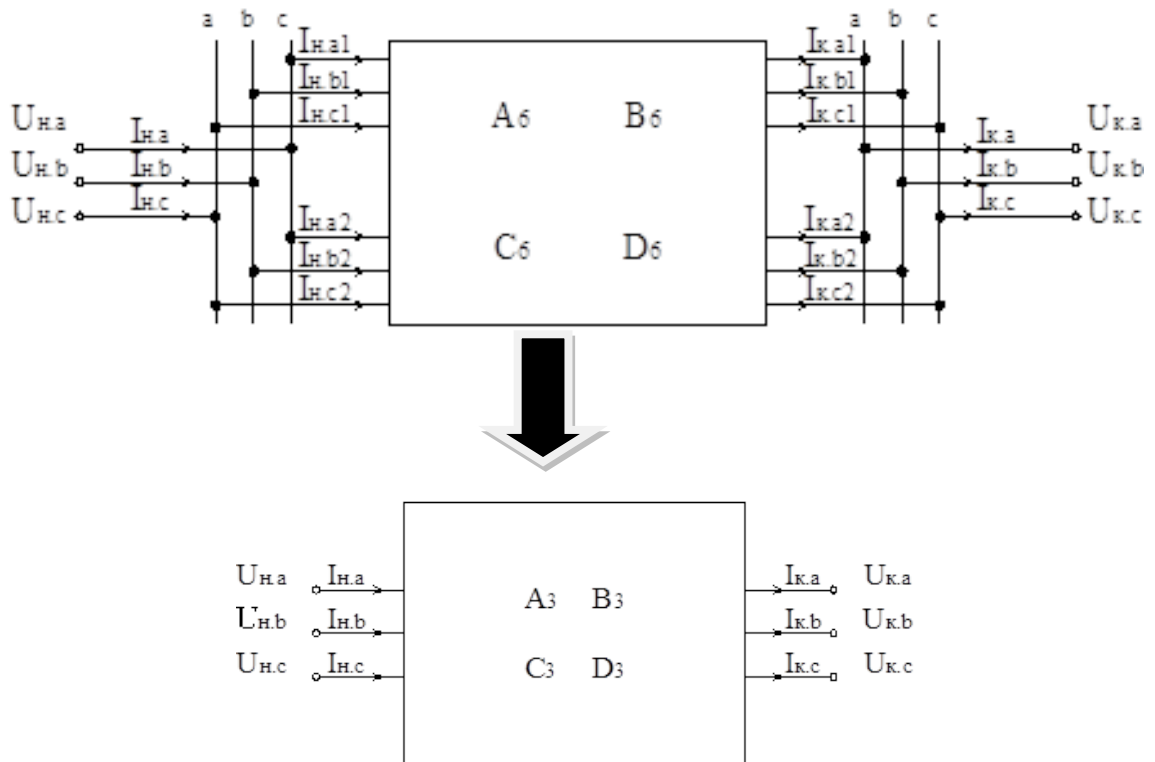


Рисунок Б.4 – Двухцепной участок сети и его одноцепной эквивалент

$$M_{л12} = \begin{pmatrix} A_{6л} & B_{6л} \\ C_{6л} & D_{6л} \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad M_{л6} = \begin{pmatrix} A_{3л} & B_{3л} \\ C_{3л} & D_{3л} \end{pmatrix}$$

Входные параметры:

M – общая матрица двухцепного участка размерностью 12х12;

Текст программы:

MS – эквивалентная общая матрица одноцепного участка размерностью 6х6.

Расчет M-матрицы одноцепного эквивалента двухцепного участка без учета взаимной связи цепей (equal2)

Модуль позволяет получить эквивалентную общую матрицу двух параллельных (несвязанных) цепей схемы размерностью 6х6 на основе исходных общих матриц каждой из цепей размерностью 6х6 (рисунок Б.5).

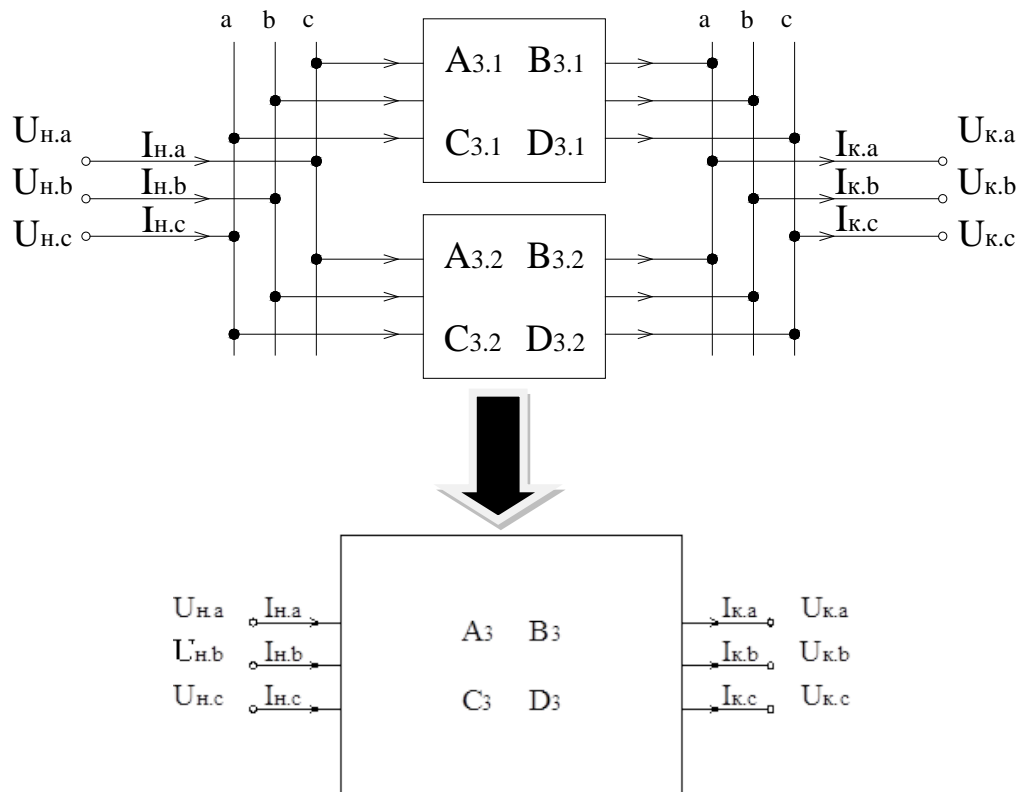


Рисунок Б.5 – Параллельные участки сети и их одноцепной эквивалент

$$\begin{matrix}
 M_1 = \begin{pmatrix} A_{3л1} & B_{3л1} \\ C_{3л1} & D_{3л1} \end{pmatrix} \\
 M_2 = \begin{pmatrix} A_{3л2} & B_{3л2} \\ C_{3л2} & D_{3л2} \end{pmatrix}
 \end{matrix}
 \Rightarrow
 M_S = \begin{pmatrix} A_{3лS} & B_{3лS} \\ C_{3лS} & D_{3лS} \end{pmatrix}$$

Входные параметры:

M1 – общая матрица первого участка размерностью 6х6;

M2 – общая матрица второго участка размерностью 6х6;

Выходные параметры:

MS – эквивалентная общая матрица одноцепного участка размерностью 6х6.

Расчет эквивалентных M -матрицы и E -матрицы (напряжений) эквивалентного источника ($equaE1E2$)

Модуль позволяет выполнить эквивалентирование источников. В результате может быть получена общая матрица M эквивалентного источника размерностью 6×6 , вектор эквивалентных ЭДС размерностью 3×1 (рисунок Б.6).

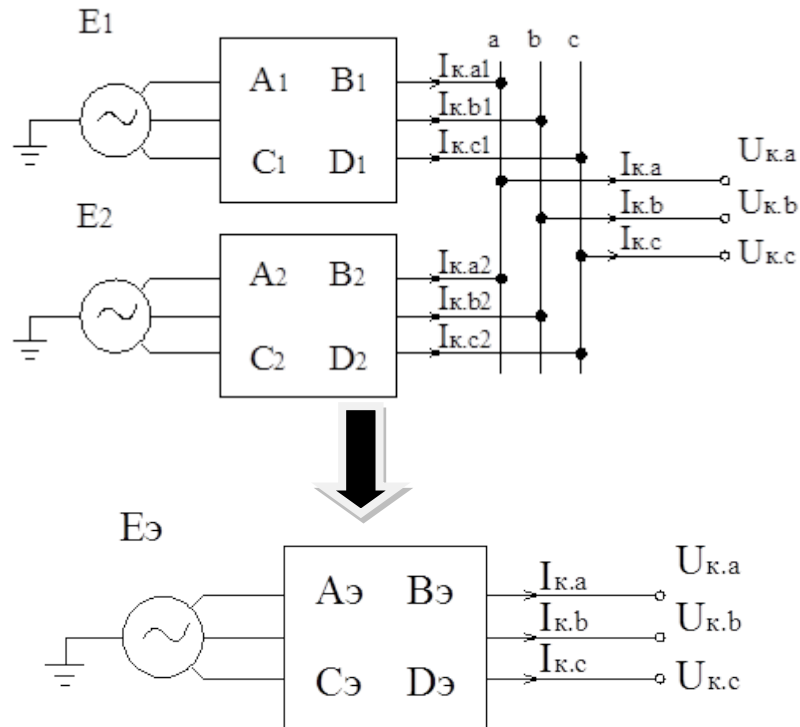


Рисунок Б.6 – Параллельные участки с источниками и их эквивалент

Входные параметры:

$E1$ – матрица ЭДС первого источника размерностью 3×1 ;

$E2$ – матрица ЭДС второго источника размерностью 3×1 ;

$M1$ – общая матрица первого участка размерностью 6×6 ;

$M2$ – общая матрица второго участка размерностью 6×6 ;

Выходные параметры:

E_{equal} – матрица эквивалентных ЭДС размерностью 3×1 ;

M_{equal} – общая эквивалентная матрица размерностью 6×6 ;

Расчет приведенной матрицы M к виду UU , для расчета токов в начале и конце участка по известным напряжениям по концам (MatrixMuu)

Модуль позволяет преобразовать исходную общую матрицу в виде “UI” к виду “UU” для расчета токов по концам участка при известных напряжениях по концам.

$$\begin{bmatrix} U_{\text{н}} \\ I_{\text{н}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\text{ui}} & B_{\text{ui}} \\ C_{\text{ui}} & D_{\text{ui}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\text{к}} \\ I_{\text{к}} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{bmatrix} I_{\text{н}} \\ I_{\text{к}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{\text{uu}} & B_{\text{uu}} \\ C_{\text{uu}} & D_{\text{uu}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_{\text{н}} \\ U_{\text{к}} \end{bmatrix}$$

Входные параметры:

Muu1 – исходная общая матрица M в виде UI;

n – размерность матрицы.

Входные параметры:

Muu – общая матрица M в виде UU;

Расчет параметров компенсирующего устройства (ParametrKU)

Модуль позволяет рассчитать матрицу проводимостей компенсирующего устройства и общую матрицу компенсирующего устройства на основе заданной уставки по напряжению, значений напряжений в узле, матрицы входных сопротивлений схемы относительно места установки.

Входные параметры:

MequalKU – общая матрица схемы относительно места установки устройства;

P – матрица параметров режима в узле;

Ustavka – уставка по напряжению, кВ.

Выходные параметры:

Mku – общая матрица компенсирующего устройства;

Расчет параметров симметрирующего устройства (ParametrSU)

Модуль позволяет рассчитать матрицу проводимостей симметрирующего устройства и общую матрицу симметрирующего устройства на основе значений напряжений в узле, матрицы входных сопротивлений схемы относительно места установки (рисунок Б.7).

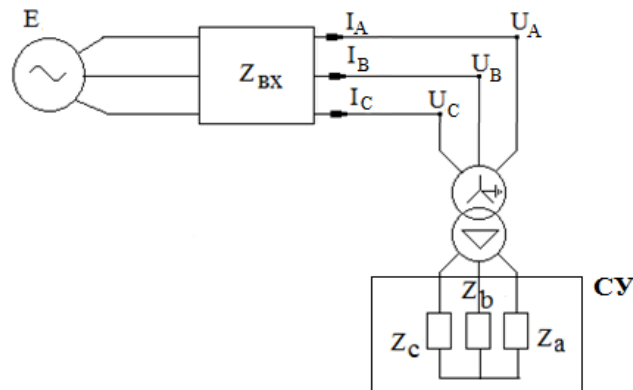


Рисунок Б.7 – Схема замещения для определения параметров симметрирующего устройства

$$\begin{aligned} X_A &= X_{\text{реж}} - \sqrt{3}R_{\text{реж}} - X_T, \\ X_B &= X_{\text{реж}} + \sqrt{3}R_{\text{реж}} - X_T, \\ X_C &= -2X_{\text{реж}} - X_T. \end{aligned}$$

Входные параметры:

MequalSU – общая матрица схемы относительно места установки устройства;

Esum – матрица напряжений в узле;

Выходные параметры:

Ysu – матрица проводимостей симметрирующего устройства;

Msu – общая матрица симметрирующего устройства.

Расчет M-матрицы силового трехфазного трехобмоточного трансформатора (Transformer3)

Модуль позволяет рассчитать общую матрицу силового трансформатора (прямую и обратную) на основе каталожных данных (значений напряжений короткого замыкания, потерь короткого замыкания, номинальных напряжений, номинальной мощности) Общая матрица трансформатора рассчитывается путем перемножения модматриц блоков А, В, С (рисунок Б.8).

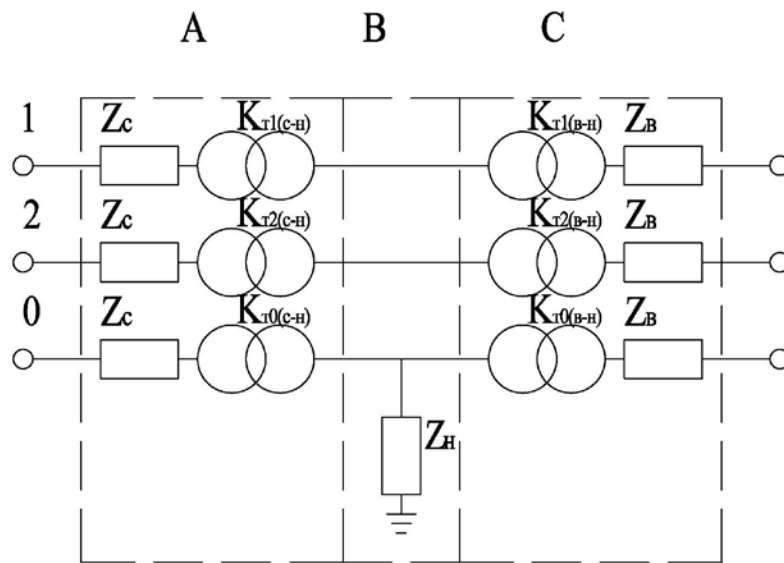


Рисунок Б.8 – Схема замещения трансформатора

Входные параметры:

U_{kVS} U_{kVN} U_{kSN} – напряжения короткого замыкания для пар обмоток, %;

P_{kVS} P_{kVN} P_{kSN} – потери короткого замыкания для пар обмоток;

U_V U_S U_N – номинальные напряжения обмоток;

S_n – номинальная мощность трансформатора.

Выходные параметры:

M_{TSV} – общая матрица повышающего трансформатора;

M_{TVS} – общая матрица понижающего трансформатора.

***Расчет значений показателей качества электроэнергии в узле
(Rezult)***

Модуль позволяет рассчитать показатели качества электроэнергии (отклонения напряжений по фазам, коэффициента несимметрии, отклонения напряжения прямой последовательности).

Входные параметры:

P – вектор параметров режима в узле;

n – размерность вектора параметров режима (3 или 6).

Выходные параметры:

$Rezultat$ – вектор столбец параметров режима размерностью 4 либо 8 (отклонения напряжений по фазам, коэффициент несимметрии, отклонение напряжения по прямой последовательности)

Вывод результатов расчета

Результаты расчета выводятся в командном окне. Результаты содержат расчетные значения фазных сопротивлений симметрирующего устройства (X_A , X_B , X_C), показатели качества электроэнергии в узлах (вектора R08-R28, сверху вниз значения отклонений напряжений по фазам, коэффициент несимметрии в узле, отклонение напряжения по прямой последовательности, для двухцепного участка приведены значения по каждой цепи последовательно), также выводятся значения мощностей, протекающие в симметрирующем и компенсирующем устройствах.

Вывод результатов:

“Параметры (сопротивления) симметрирующего устройства”

$X_A =$
0 -3.8585e+003i

$X_B =$
0 +3.6586e+003i

$X_C =$
0 -52.1013i

“Матрица M симметрирующего устройства”

MSU =

1.0000	0	0	0	0	0	0
0	1.0000	0	0	0	0	0
0	0	1.0000	0	0	0	0
0 - 0.0040i	0 - 0.0037i	0 - 0.0042i	1.0000	0	0	0
0 - 0.0037i	0 - 0.0042i	0 - 0.0040i	0	1.0000	0	0
0 - 0.0042i	0 - 0.0040i	0 - 0.0037i	0	0	1.0000	0

“Показатели качества в узлах” (для примера даны результаты только в двух узлах Таксимо и Окусикан)

R08 =

4.1131
1.4845
7.9924
0.2416
3.5379

R09 =

4.5098
2.8764
6.7057
0.5439
3.6783
4.7493
2.6956
7.3642
0.2027
3.8711

“Генерация мощности от источников”

PactivY =

145.0467 154.9550 148.1800

ReactivY =

10.8141 9.9060 18.2596

“Мощность протекающая через симметрирующее устройство”

PactivSU =

14.3073 -7.3832 -6.9241

ReactivSU =

-0.1170 1.8155 -0.9940

“Мощность протекающая через компенсирующее устройство”

PactivKU =

1.0e-014 *

0.2556 -0.6446 -0.7116

ReactivKU =

-41.7412 -40.0844 -44.2475

ПРИЛОЖЕНИЕ В ПРОВЕРОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ПРОГРАММЫ «РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНОГО РЕЖИМА»

В работе предложена методика расчета несимметрии в протяженной высоковольтной сети, включающая матричные модели в фазных координатах всех элементов сети, способы эквивалентирования и преобразования отдельных участков сети, а также алгоритм расчета несимметрии.

Предлагаемый алгоритм расчета несимметрии с использованием фазных составляющих реализован в среде MatLab для протяженной сети (Приложение Б), включающей различные трехфазные элементы, для описания которых используются матричные модели.

Для того чтобы исключить возможные ошибки при реализации алгоритма, следует сделать проверку его путем проведения расчетов другим способом, в другой среде. В качестве такого способа применён алгоритм с использованием симметричных составляющих в среде MathCad. Для этого несимметрия в схеме западного участка сети БАМ (рисунок Б.1) создается путем включения нагрузки в узле 08 (ПС 220 кВ Таксимо) только в фазе «а». В фазах «b» и «с» нагрузка отсутствует. Нагрузки в остальных узлах схемы во всех фазах задаются одинаковыми.

В таблице В.1 результаты отдельных расчетов режима во всех узлах схемы с использованием фазных и симметричных составляющих.

При полном совпадении этих расчетов работоспособность предложенного алгоритма подтверждается.

Таблица В.1 - Результаты поверочного расчета методом симметричных составляющих

Узел	Расчет методом фазных координат в разработанной программе				Поверочный расчет методом симметричных составляющих			
	U _a ,кВ	U _b ,кВ	U _c ,кВ	K _{2U} ,%	U _a ,кВ	U _b ,кВ	U _c ,кВ	K _{2U} ,%
Таксимо	102,8	120,9	124	8,52	102,8	120,9	124	8,52
Уоян	108,4	121,4	123,9	6,39	108,4	121,4	123,9	6,39
Северобайкальск	112,9	123,4	123,9	4,8	112,9	123,4	123,9	4,8
Киренга	118,3	126,4	125,6	3,5	118,3	126,4	125,6	3,5
Коршуниха	134,8	137,7	136,6	1,4	134,8	137,7	136,6	1,4

Сравнение расчета с использованием фазных составляющих с верификационным расчетом с использованием симметричных составляющих показывает их полное совпадение.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЕРОЧНОГО РАСЧЕТА ДЛЯ УЧАСТКА СЕТИ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ НА МОДЕЛИ MATLAB SIMULINK

Для подтверждения результатов расчетов на нелинейной модели, приведенных в Приложении А, проведено моделирование режима работы расчетной схемы (рисунок А.1) в программном комплексе MatLab Simulink.

Параметры нагрузки, линий, источника в модели (рисунок Г.1) заданы в соответствии моделью, приведенной в приложении А.

Нагрузки в узлах 2,3,4:

$$S_2 = [2.3437 + 1.4703i; \quad 3.4108 + 1.7978i; \quad 3.0697 + 3.7625i] \text{ MVA}$$

$$S_3 = [2.2227 + 2.9714i; \quad 4.1026 + 1.6167i; \quad 3.9767 + 2.5720i] \text{ MVA}$$

$$S_4 = [2.2209 + 2.9691i; \quad 4.1000 + 1.6157i; \quad 4.5228 + 4.6837i] \text{ MVA}$$

Напряжение источника:

$$U_A = 130 (0^\circ) \text{ кВ};$$

$$U_B = 121 (-120^\circ) \text{ кВ};$$

$$U_C = 130 (120^\circ) \text{ кВ};$$

Подключаемое симметрирующее устройство (сопротивления приведены к стороне 10 кВ):

$$X_a = 5.9811 * I \text{ Ом};$$

$$X_b = -0.8403 * i \text{ Ом};$$

$$X_c = -5.7172 * I \text{ Ом}.$$

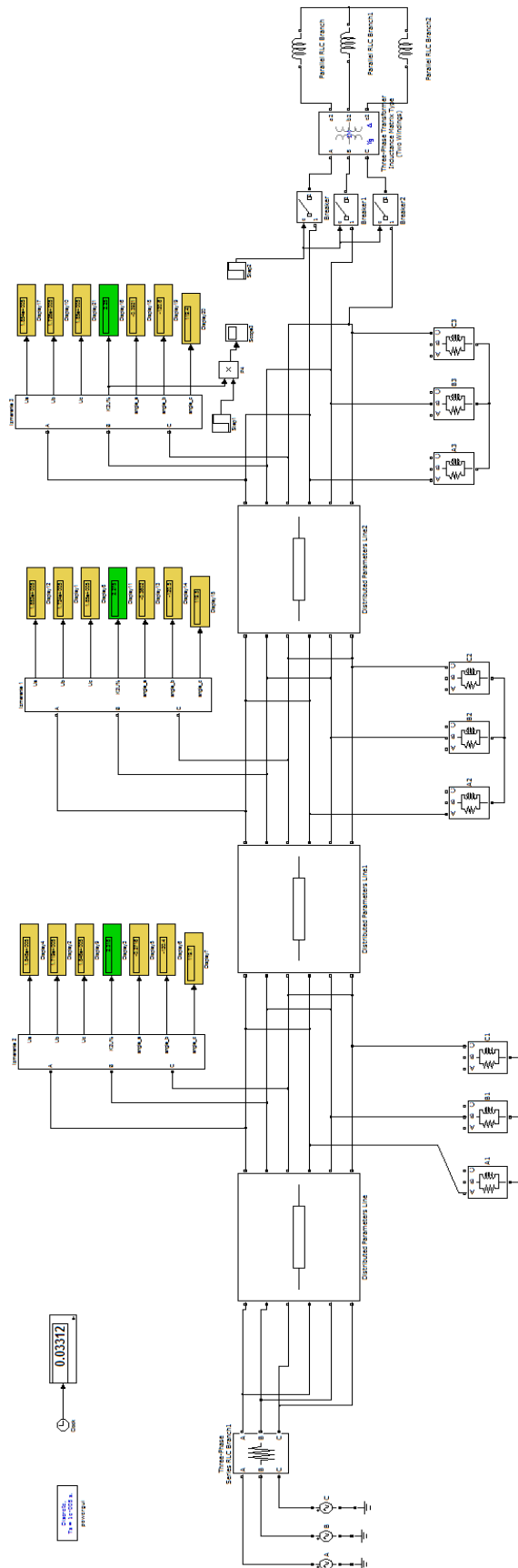


Рисунок Г.1 – Расчетная модель для поверочного расчета в MatLab Simulink

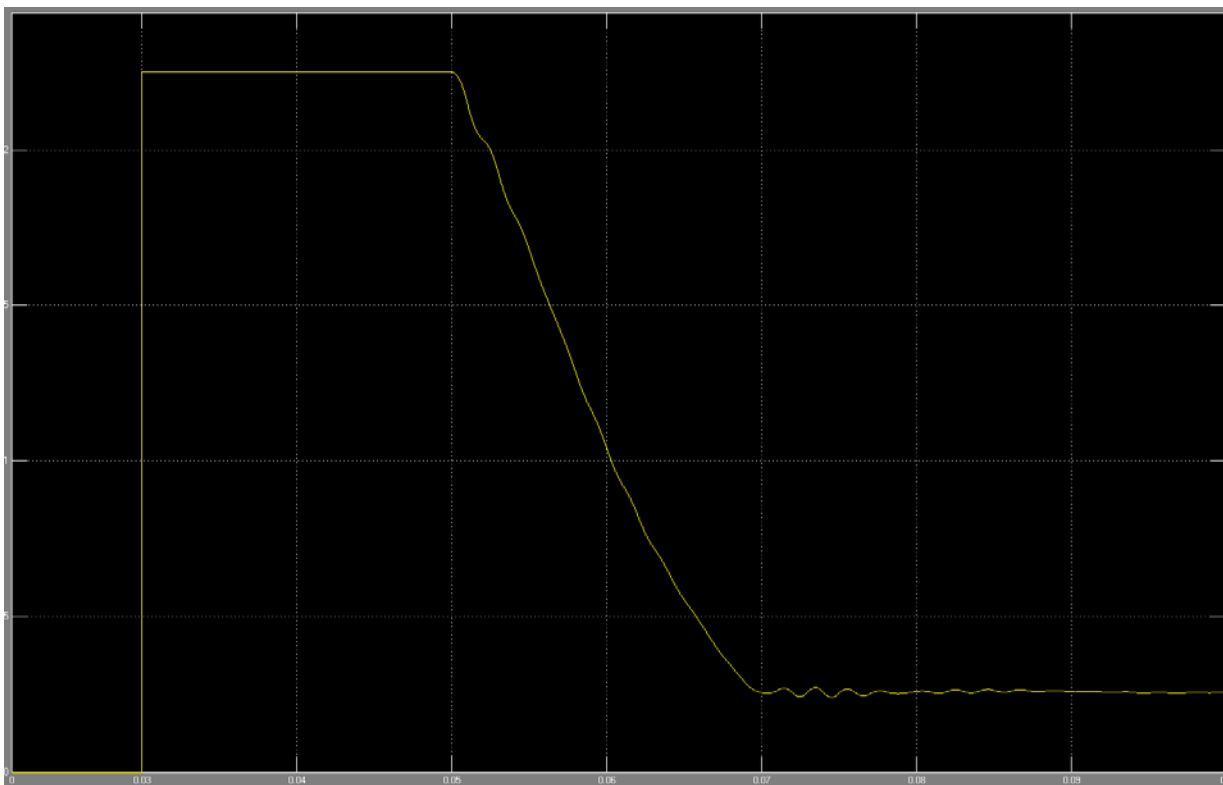


Рисунок Г.2 – Значение коэффициента несимметрии $K_{2u}\%$ в узле 4 до и после включения СУ

В момент времени 0,05 с от начала расчета вводится в работу симметрирующее устройство. Как видно из рисунка Г.2 коэффициент несимметрии в узле снижается при этом с 2,25% до 0,17%. Коэффициенты несимметрии в остальных узлах также снижаются. Сравнение результатов проверочных расчетов по Приложению А и приложению Г приведено в таблице Г.1.

Таблица Г.1 - Результаты поверочного расчета на модели Simulink

Параметр		Линейная модель нагрузки (Z)	Нелинейная модель нагрузки (P,Q)	Модель Simulink
До включения СУ	K2U% в узле 2	2,25	-	2,32
	K2U% в узле 3	2,16		2,27
	K2U% в узле 4	2,107		2,25
После включения СУ	K2U% в узле 2	1,55	1,54	1,56
	K2U% в узле 3	0,76	0,73	0,82
	K2U% в узле 4	0,001	0,06	0,17

Результаты полученные на расчетной модели, выполненной в MatLab Simulink, соотносятся с результатами, полученными на модели выполненной в фазных координатах (Приложение А), и подтверждают достоверность предложенного в работе метода определения параметров симметрирующего устройства.

«УТВЕРЖДАЮ»



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы Анохина Б.А.

Настоящий акт составлен в том, что разработки и рекомендации диссертационной работы Анохина Б.А. , представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, касающиеся снижения отклонений напряжения и несимметрии в протяжённой сети 220 – 500 кВ, питающей тяговую нагрузку, используются в ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Сибири при выборе путей решения проблемы, связанной с повышением качества электроэнергии в системах внешнего электроснабжения Байкало-Амурской магистрали и Забайкальской железной дороги.

Особый интерес представляют рекомендации по выбору схем и основных параметров симметрирующих устройств и предложения по микропроцессорным системам управления симметрирующими устройствами применительно к их схемам на базе тиристорно-реакторной группы, а также управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием, которые могут быть использованы при создании опытно-промышленных образцов симметрирующих устройств.

Главный инженер филиала ОАО «ФСК ЕЭС» – МЭС Сибири


Балашов М. М.