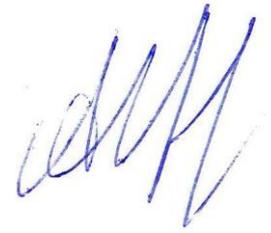


На правах рукописи



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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук
Красильникова Татьяна Германовна

Официальные оппоненты: **Сальников Василий Герасимович**
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта», кафедра «Электроэнергетических систем и электротехники», профессор
Крюков Андрей Васильевич
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электроэнергетика транспорта», профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится «28» июня 2018 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Новосибирском государственном техническом университете по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations/view?id=16801

Автореферат разослан «__» мая 2018 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Анастасия Георгиевна Русина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время нагрузка железнодорожных магистралей в Сибири и на Дальнем Востоке растет быстрыми темпами. Существующие сети внешнего электроснабжения железных дорог весьма протяженные, 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 собой 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 при 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.

Объектом исследования являются протяженные сети внешнего электроснабжения железных дорог на примере сети 220 – 500 кВ Байкало-Амурской магистрали (БАМ).

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, при непосредственном участии автора диссертации 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 трехфазной сети, питающей тяговую нагрузку.
- Анализ несимметрии в протяженной сети (на примере сети 220-500 кВ БАМ) для электроснабжения тяговой нагрузки.
- Определение параметров симметрирующих устройств, обеспечивающих требуемый уровень несимметрии.
- Обоснование алгоритма управления параметрами симметрирующих устройств и формирование рекомендаций по системам автоматического управления симметрирующими устройствами.

Методы исследования. При выполнении исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников по теме исследований, 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.

Положения, выносимые на защиту:

1. Анализ несимметрии в протяженной сети с тяговой нагрузкой, различающейся 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. В работе предложен метод определения параметров симметрирующего устройства с использованием комплексных величин фазных напряжений в месте его установки при учете остальной сети обобщенным комплексным режимным параметром, который в процессе работы СУ при необходимости может корректироваться. Предложенный метод позволяет рассчитать пофазные параметры СУ, требуемые для снижения несимметрии напряжений в месте подключения до допустимой величины.

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 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 ее применения, а также программной реализацией в среде Matlab разработанной методики анализа несимметрии и метода определения параметров СУ с использованием двух различных методов, дающих совпадающие результаты.

Научная новизна диссертации заключается в разработке методических основ для выбора 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 трехфазной сети с тяговой нагрузкой, содержащей оригинальные методы эквивалентирования участков сети.

- Разработан и обоснован численными экспериментами оригинальный метод определения параметров симметрирующего устройства, основанный на использовании комплексных величин фазных напряжений в месте его установки при учете остальной сети входным сопротивлением по обратной последовательности.

- 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 трехфазной сети, питающей тяговую нагрузку.

- Аналитические соотношения для определения параметров симметрирующих устройств.

- 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 протяженной 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, на международной молодежной научно-технической конференции «Управление, информация и оптимизация в электроэнергетических системах» НГТУ – Новосибирск, 2011, на научных семинарах кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета.

Личный вклад автор: Автором совместно с руководителем выполнена 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 научном журнале.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены научная новизна,

практическая ценность и достоверность результатов работы, описана структура диссертации в целом.

Первая глава посвящена обзору схем электроснабжения железных дорог и особенностям их работы. Система электроснабжения железных дорог состоит из двух частей. Внешняя часть системы электроснабжения включает в себя все устройства от электростанции до линий электропередач, подводящих энергию к тяговым подстанциям. Тяговая часть системы электроснабжения состоит из тяговых подстанций и тяговой сети. Тяговая сеть в свою очередь состоит из контактной сети, рельсового пути, питающих и отсасывающих линий, а также других устройств, присоединяемых по длине линии к контактной подвеске непосредственно или через специальные автотрансформаторы.

Наибольшее распространение находят следующие системы электрической тяги: постоянного тока, однофазного тока промышленной частоты и однофазного тока пониженной частоты. В России и, в частности, на БАМ, используется система однофазного тока промышленной частоты 50 Гц при напряжении 25 кВ. Неравномерность нагрузки по фазам приводит к несимметрии в сети.

Одной из распространенных схем внешнего электроснабжения железных дорог в нашей стране является схема подключения тяговых подстанций от линии передачи 110 – 220 кВ, идущей вдоль железной дороги. 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. Однофазные приемники электроэнергии воспринимают несимметрию напряжения 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 и 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 вызывают дополнительный нагрев статора и 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%.

Для определения электрических величин в сложно несимметричных режимах целесообразно выполнение расчетов непосредственно в фазных координатах взамен методов использования симметричных составляющих. Применение метода фазных координат эффективно в при необходимости учета пофазных различий в параметрах линий и параметрах нагрузки. 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, следует учитывать сложную конфигурацию сети. 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.

Проблема моделирования ЛЭП, трансформаторов, нагрузки и сети в целом в фазных координатах при расчете режимов таких сетей в настоящее время решается с использованием следующих программных средств:

1. комплекс EUROSTAG, позволяющий моделировать работу энергосистемы в несимметричных режимах;
2. программа EMTP, позволяющая помимо расчетов переходных процессов электромагнитного и электромеханического характера проводить также анализ установившихся несимметричных режимов;
3. имитационный комплекс FAZANORD, разработанный в Иркутском государственном университете путей сообщения, и предназначенный для моделирования электрических систем и систем тягового электроснабжения электрифицированных железных дорог переменного тока с учетом перемещающихся тяговых нагрузок.

В перечисленных выше программных комплексах используются итерационные методы, позволяющие рассчитывать конкретные режимы и мало приспособленные для получения общих закономерностей между анализируемыми переменными. 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.

Во второй главе приведено описание первой части предложенной методики, включающей матричные модели в фазных координатах основных элементов протяженной высоковольтной сети и оригинальные способы эквивалентирования и преобразования отдельных участков сети. Матричная форма записи уравнений элементов протяженной сети является компактной и наглядной. Каждый элемент сети представляется в виде многополюсника (рисунок 1), число полюсов которого в общем случае различно.

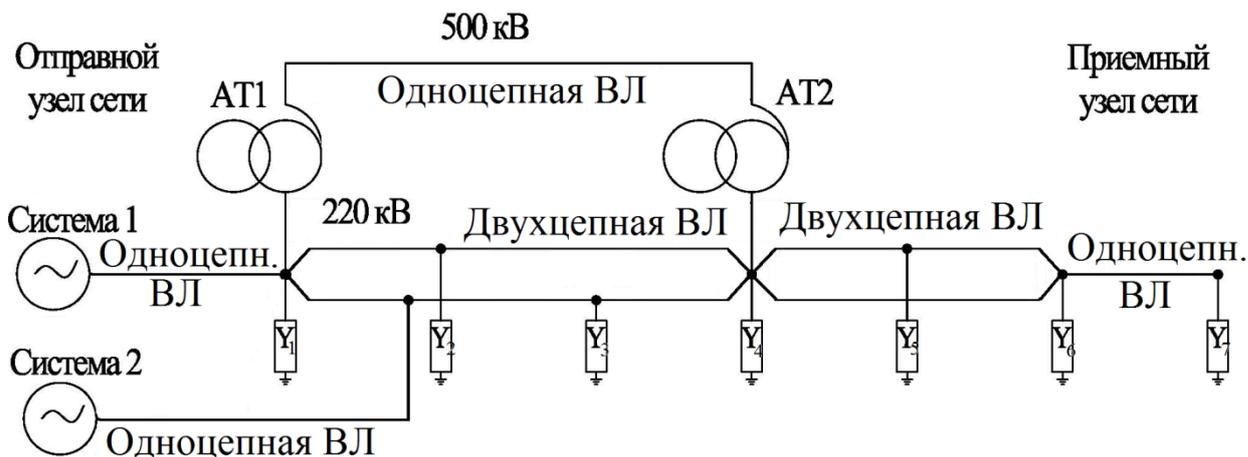


Рисунок 1 - Участок протяженной сети

Любой элемент одноцепной трехфазной схемы в фазных координатах представляет 6-полюсник (рисунок 2а). Элемент двухцепной трехфазной схемы в фазных координатах представляет собой 12-полюсник (рисунок 2б).

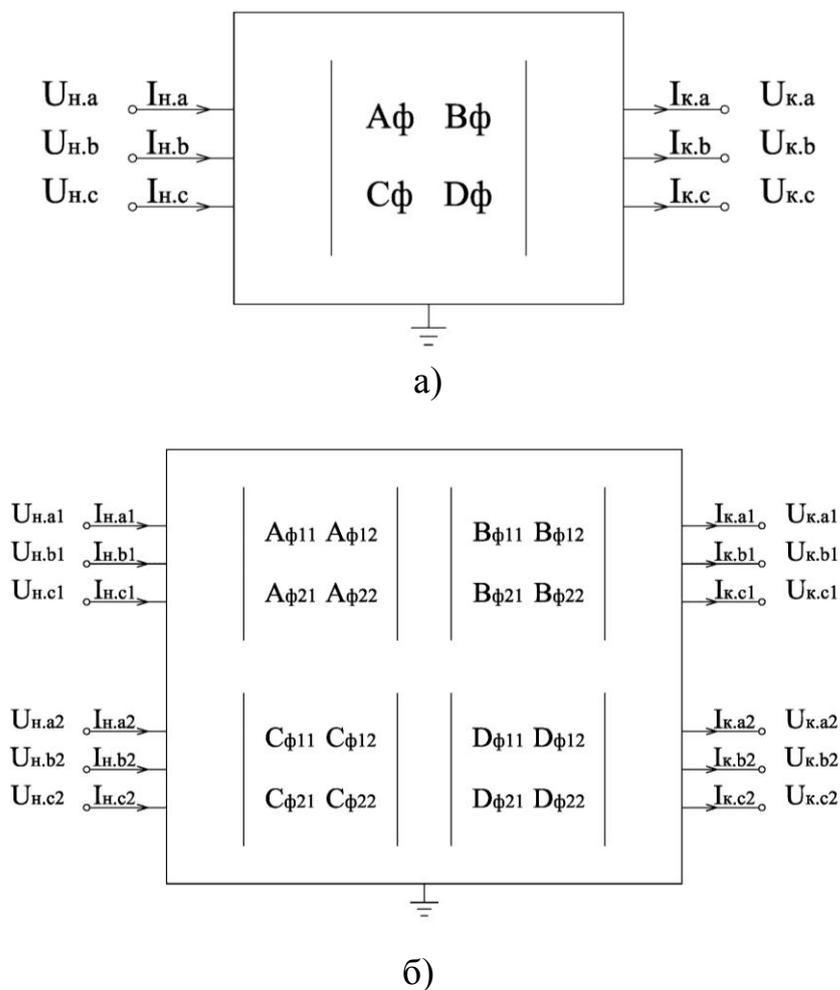


Рисунок 2 - Представление элементов 3-фазной схемы в виде многополюсников: а – одноцепная 3-фазная схема в виде 6-полюсника; б – двухцепная 3-фазная схема в виде 12-полюсника

В главе рассмотрены вопросы матричного моделирования конкретных элементов сети и определены их коэффициенты в фазных координатах в зависимости от первичных параметров этих элементов, включая матричные модели:

- одноцепной воздушной линии (ВЛ);
- двухцепной ВЛ;
- шунтирующих элементов, к которым относятся неравномерная тяговая нагрузка и устройства реактивной мощности, подключаемые параллельно к сети;
- повышающего и понижающего автотрансформаторов.

При расчете режимов протяженной 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. Подробное описание метода приведено в диссертационной работе. Также приведены методы эквивалентирования примыкающих систем относительно заданного узла и получены соотношения для преобразования треугольной схемы соединения шестиполюсников в звезду.

В третьей главе дается вторая часть разработанной методики, включающая описание безытерационного алгоритма расчета несимметрии в аналитической форме, основанного на линейаризации тяговой нагрузки. С использованием этого алгоритма проводится анализ режимов работы сети внешнего электроснабжения на примере сети внешнего электроснабжения (СВЭ) БАМ при различных точках раздела сети. Дана оценка отклонениям напряжения и коэффициентам несимметрии.

Предложенный алгоритм расчета режима напряжений в сети внешнего электроснабжения (рисунок 3) включает следующие шаги.

На 1-ом шаге осуществляется эквивалентирование двухцепных участков к одноцепным, как это предлагается в главе 2, и приведение схемы к каскадно соединенным трехфазным элементам между эквивалентной ЭДС и точкой раздела.

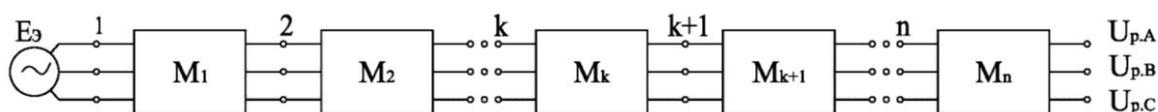


Рисунок 3 - Схема каскадно соединенных трехфазных элементов

На 2-ом шаге схема каскадно соединенных трехфазных элементов приводится к эквивалентной схеме. Матрица коэффициентов эквивалентной схемы соответственно находится как

$$M_{\text{э}} = \begin{vmatrix} A_{\text{э}} & B_{\text{э}} \\ C_{\text{э}} & D_{\text{э}} \end{vmatrix} = \prod_{k=1}^N M_k \quad (1)$$

где M_k – матрица коэффициентов k -го элемента.

Далее определяется напряжение в точке раздела

$$U_{\text{рф}} = A_{\text{э}}^{-1} E_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{э}} = (\underline{E}_{\text{э}a} \quad \underline{E}_{\text{э}b} \quad \underline{E}_{\text{э}c})^T$ – вектор-столбец эквивалентных фазных ЭДС;
 $U_{\text{рф}} = (\underline{U}_{\text{ра}} \quad \underline{U}_{\text{рб}} \quad \underline{U}_{\text{рс}})^T$ – вектор-столбец фазных напряжений в точке раздела.

На 3-ем шаге находятся напряжения в узловых точках схемы, изображенной на рисунке 3. Для этого используются следующие соотношения

$$U_{\text{кф}} = A_{\text{кр}} U_{\text{рф}} = A_{\text{кр}} A_{\text{э}}^{-1} E_{\text{э}} \quad (3)$$

где $k = \overline{1, N}$; $M_{\text{кр}} = \begin{vmatrix} A_{\text{кр}} & B_{\text{кр}} \\ C_{\text{кр}} & D_{\text{кр}} \end{vmatrix} = \prod_{v=k}^N M_v$ – матрица коэффициентов на участке

$k - p$; M_v – матрица коэффициентов v -ого элемента.

На 4-ом шаге определяются напряжения в промежуточных пунктах двухцепных участков схемы. Для решения этой задачи используется расчетная схема, показанная на рисунке 4.

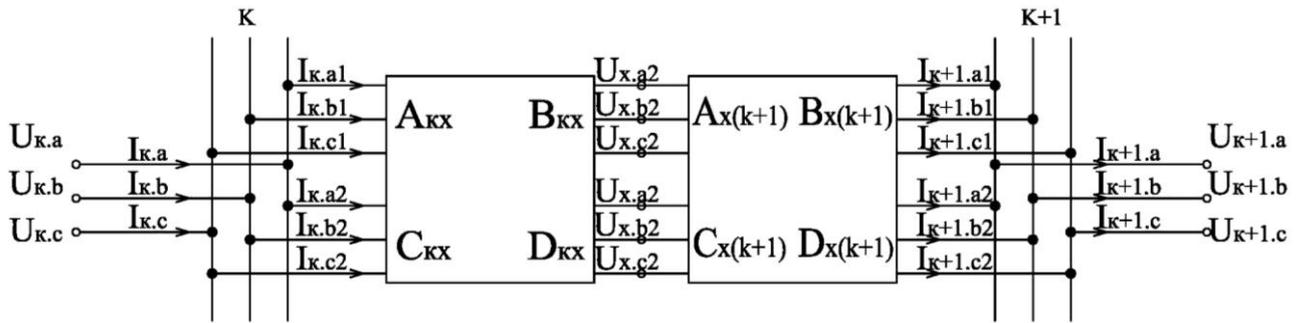


Рисунок 4 - Схема для расчета напряжений в промежуточном пункте двухцепного участка

Доказано, что напряжение в промежуточных точках двухцепного участка определяется через напряжения в концевых узлах и матричные коэффициенты B соответствующих частей двухцепного участка

$$U_x = B_{x(k+1)} \cdot B_k^{-1} \cdot U_k + B_{kx} \cdot B_k^{-1} \cdot U_{k+1}. \quad (4)$$

Соответственно напряжение на каждой из цепей найдется из

$$U_x = \begin{vmatrix} U_{x.1} \\ U_{x.2} \end{vmatrix}, \quad (5)$$

где $U_{x.1} = (\underline{U}_{x.a1} \quad \underline{U}_{x.b1} \quad \underline{U}_{x.c1})^T$, $U_{x.2} = (\underline{U}_{x.a2} \quad \underline{U}_{x.b2} \quad \underline{U}_{x.c2})^T$ – вектор-столбцы искомых фазных напряжений в промежуточном пункте соответственно для 1-й и 2-й цепей двухцепного участка.

На 5-ом шаге определяются отклонения напряжений и коэффициенты несимметрии на узловых и промежуточных подстанциях СВЭ. Результаты

расчета коэффициентов несимметрии и отклонений напряжений и при движении поездов с интервалами 50 мин при отсутствии средств симметрирования для западной части БАМ приведены соответственно на рисунках 5 и 6.

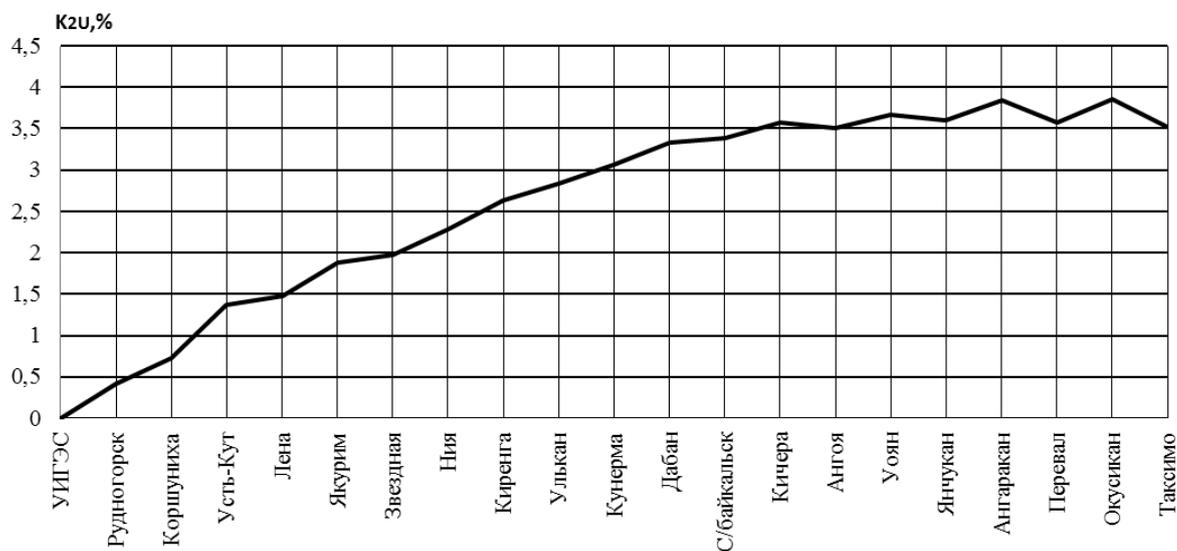


Рисунок 5 - Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности

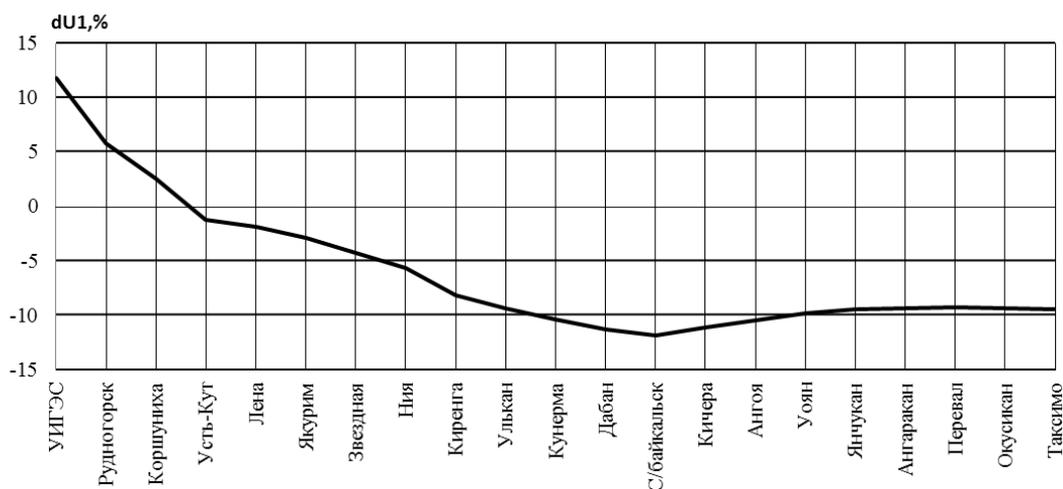


Рисунок 6 - Отклонения напряжений

Полученные значения отклонений напряжений и коэффициентов несимметрии для западной и восточной части СВЭ БАМ говорят о необходимости использования устройств компенсации реактивной мощности для повышения уровней напряжений и симметрирующих устройств для устранения недопустимой несимметрии.

В четвертой главе рассмотрены способы повышения показателей качества электроэнергии на примере СВЭ БАМ. Приведены общие положения по выбору параметров компенсирующих устройств и особенности их применения в сети БАМ. Предложен оригинальный метод определения параметров симметрирующих устройств, основанный на использовании комплексных величин фазных напряжений в месте его установки при учете остальной сети входным сопротивлением по обратной последовательности.

Симметрирующее устройство 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 непосредственно к линии, либо к обмотке трансформатора (автотрансформатора), соединенной по схеме треугольника.

Как показал предварительный анализ, для введения коэффициентов несимметрии в допустимую область вдоль всей трассы, обычно достаточно установки СУ на одной из подстанций (ПС), где имеют место наибольшие коэффициенты несимметрии. Тогда расчетную схему можно представить вектором эквивалентных фазных ЭДС и матрицей входных фазных и межфазных сопротивлений всей схемы относительно ПС, на которой устанавливаются СУ (рисунок 7).

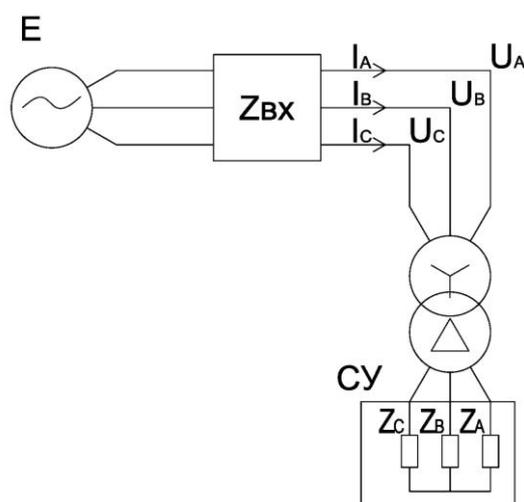


Рисунок 7 - Расчетная схема для определения параметров СУ

Уравнения расчетной схемы в фазных координатах в матричной форме имеют вид

$$\begin{aligned} E &= U + Z_{\text{вх}} I, \\ U &= Z I, \end{aligned} \tag{6}$$

где E - вектор эквивалентных ЭДС; U - вектор напряжений после введения в работу СУ; I - вектор токов на стороне линии; $Z_{\text{вх}}$ - матрица входных собственных и взаимных сопротивлений питающей сети относительно места установки СУ; $Z = Z_{\text{су}}$ - матрица искомых параметров СУ, определенных относительно точки его подсоединения к линии. Вид последней матрицы зависит от рассматриваемой расчетной схемы.

Подход к выбору параметров СУ формулируется исходя из условия максимального снижения напряжения обратной последовательности в месте установки СУ. При этом дополнительно можно задать, чтобы СУ не оказывало влияние на напряжение прямой последовательности, что будет иметь место, если ток прямой последовательности, протекающий через СУ, будет равен нулю. В этом случае условия для выбора параметров СУ запишутся:

$$\underline{U}_2 = 0, \quad \underline{I}_1 = 0, \quad (7)$$

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

Тогда система уравнений в фазных координатах (6) относительно симметричных составляющих запишется

$$\begin{aligned} \underline{E}_{\text{сим}} &= \underline{U}_{\text{сим}} + \underline{Z}_{\text{вх.сим}} \underline{I}_{\text{сим}}, \\ \underline{E}_{\text{сим}} &= \underline{Z}_{\text{сим}} \underline{I}_{\text{сим}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\underline{E}_{\text{сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{E}$ – вектор эквивалентных эдс для симметричных составляющих; $\underline{U}_{\text{сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{U}$ – вектор напряжений для симметричных составляющих; $\underline{Z}_{\text{вх.сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{Z}_{\text{вх}} \underline{S}$ – матрица входных собственных и взаимных сопротивлений питающей сети относительно места установки СУ для симметричных составляющих; $\underline{Z}_{\text{сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{Z} \underline{S}$ – матрица искомых параметров СУ для симметричных составляющих.

Последняя матрица есть функция искомых фазных сопротивлений СУ $\underline{Z}_{\text{сим}}(\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c)$. Решение системы (8) при выполнении условий, указанных выше, дает искомые параметры $\underline{X}_a, \underline{X}_b, \underline{X}_c$. При решении системы (8) задается еще одно дополнительное условие, состоящее в том, чтобы коэффициент нулевой последовательности не превышал допустимую величину. Как правило, для рассматриваемой сети оно выполняется со значительным запасом, как в месте установки СУ, так и в остальных точках сети. Для случая расположения СУ за трансформатором система (8) имеет решение, позволяющее аналитически найти искомые параметры СУ. Матрица искомых параметров СУ для данной схемы будет иметь вид:

$$\underline{Z}_{\text{сим}} = \underline{S}^{-1} \underline{Z} \underline{S} = \begin{vmatrix} \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} & 0 \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_T \end{vmatrix}, \quad (9)$$

где $\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{22} = j \left(\underline{X}_T + \frac{\underline{X}_a + \underline{X}_b + \underline{X}_c}{3} \right)$ – собственное входное сопротивление СУ по прямой (или обратной) последовательности относительно места его подключения;

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

Решая уравнение (8) с учетом (9) и условий $\underline{U}_2 = 0$, $\underline{I}_1 = 0$ можно получить:

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{22} &= j \left(\underline{X}_T + \frac{\underline{X}_a + \underline{X}_b + \underline{X}_c}{3} \right) = 0 \\ \underline{Z}_{12} &= -\frac{j}{3} (a^2 \underline{X}_a + a \underline{X}_b + \underline{X}_c) = \underline{Z}_{\text{реж}} \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

где: $\underline{Z}_{\text{реж}}$ - режимный параметр, величина которого зависит от параметров режима и изменяется при работе сети. Проведенный анализ показал, что режимное сопротивление практически не зависит от параметров нулевой последовательности и с высокой степенью точности определяется простой зависимостью

$$\underline{Z}_{\text{реж}} = R_{\text{реж}} + jX_{\text{реж}} = \frac{E_1}{E_2} \underline{Z}_{\text{вх}} \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) можно получить аналитические выражения для определения параметров СУ:

$$\begin{aligned} X_a &= X_{\text{реж}} - \sqrt{3}R_{\text{реж}} - X_T, \\ X_b &= X_{\text{реж}} + \sqrt{3}R_{\text{реж}} - X_T, \\ X_c &= -2X_{\text{реж}} - X_T. \end{aligned} \quad (12)$$

Таким образом, режимное сопротивление и соответственно параметры СУ зависят от комплексных значений 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 вышеприведенного метода выбраны параметры симметрирующих устройств. Ниже приведены результаты расчета режима работы сети при установке СУ в месте наибольшей несимметрии.

Условная схема сети при разделе на ПС Таксимо показана на рисунке 8.

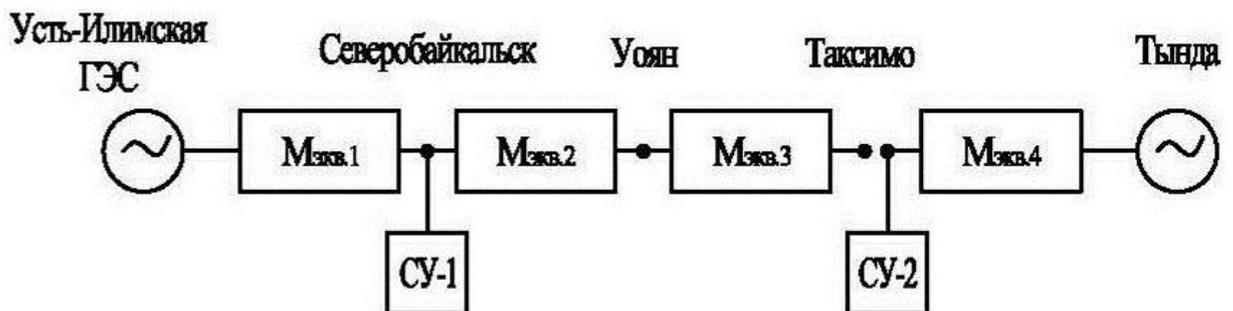
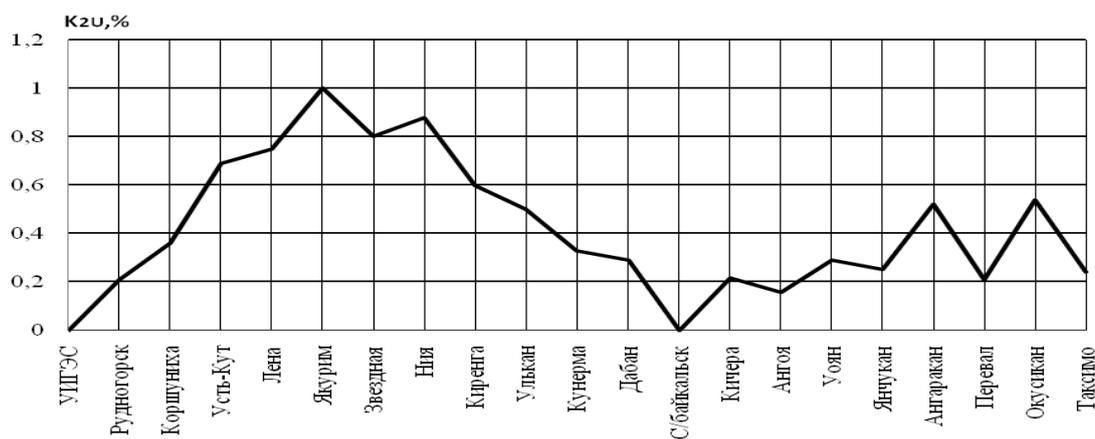
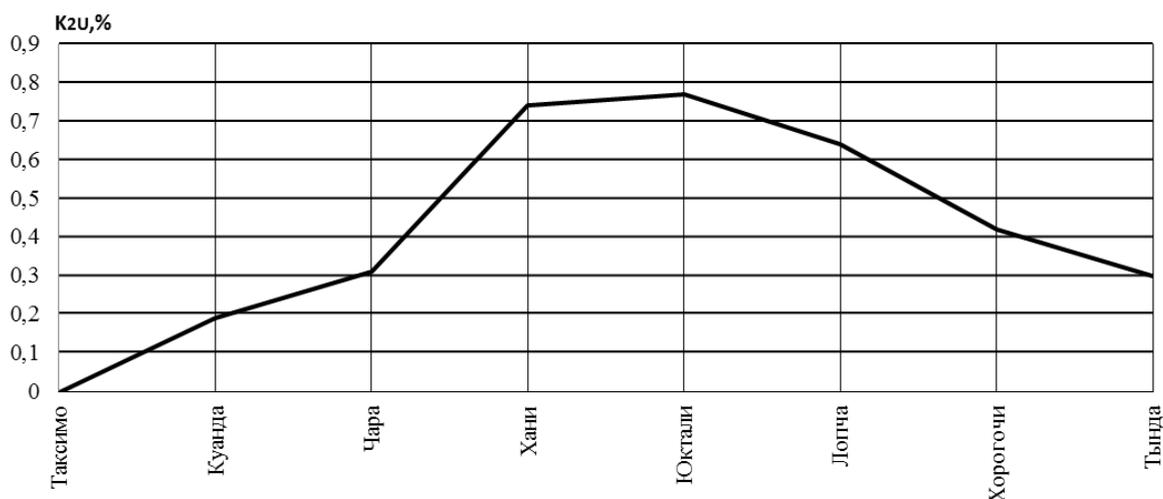


Рисунок 8 - Раздел СВЭ на ПС Таксимо

Результаты расчета несимметрии для западной и восточной частей БАМ приведены на рисунках 9 а и б.



а)



б)

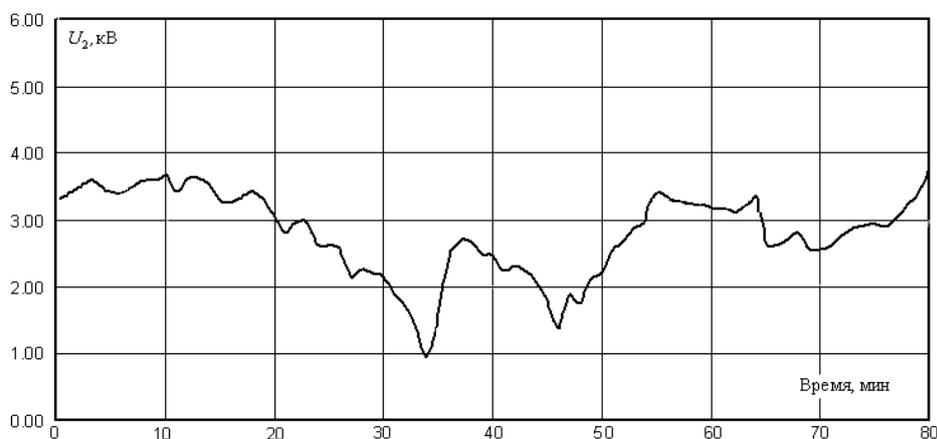
Рисунок 9 - Коэффициенты несимметрии по обратной последовательности: а – западный участок БАМ; б – восточный участок БАМ

Несимметрия на всех подстанциях западного и восточного участков БАМ после установки СУ находится в пределах нормы. Для поддержания допустимого уровня несимметрии в западной части БАМ необходимо установить СУ мощностью 25 МВА на ПС Северобайкальск, а в восточной - СУ мощностью 7 МВА на ПС Таксимо.

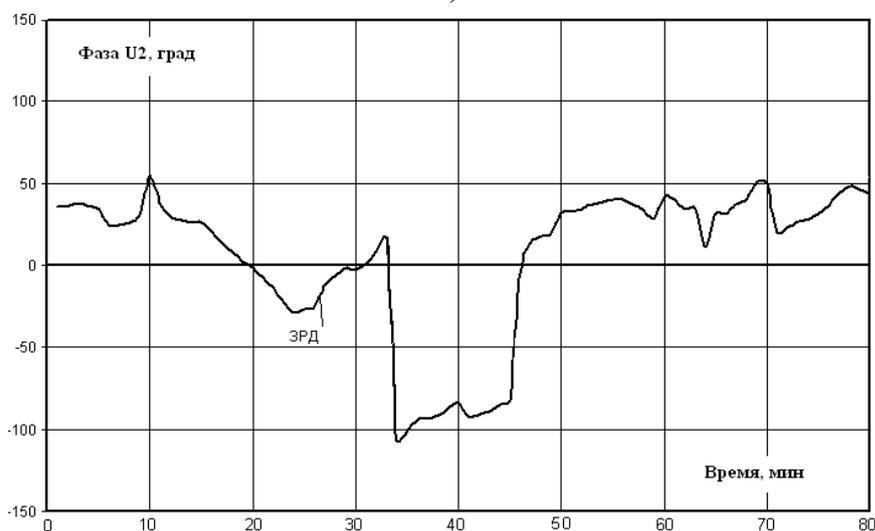
В пятой главе предлагается алгоритм управления параметрами СУ в протяженной высоковольтной сети, питающей тяговую нагрузку, и даются рекомендации по созданию системы автоматического управления симметрирующим устройством, применительно к схемам СУ на базе тиристорно-реакторной группы, а также управляемого шунтирующего реактора.

Параметры СУ определяются величиной режимного сопротивления, которое, в свою очередь, зависит от двух режимных величин (напряжений холостого хода прямой и обратной последовательности в месте установки СУ) и входного сопротивления сети по обратной (прямой) последовательности относительно пункта размещения СУ.

Как показывает анализ, приведенный в техническом отчете «Пилотный проект по применению технических средств ААС в системах электроснабжения БАМ и Забайкальской железной дороги», выполненном, при непосредственном участии автора в 2011 году филиалом АО «НТЦ ФСК ЕЭС» – СибНИИЭ, модуль напряжения обратной последовательности на межпоездном интервале меняется в десятки раз (рисунок 10, а), 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 10, б). Отсюда вытекает определяющее влияние изменений напряжения обратной последовательности на выбор алгоритма управления параметрами СУ.



а)



б)

Рисунок 10 - Изменение напряжения обратной последовательности на межпоездном интервале для ПС Таксимо: а - модуль напряжения; б - фаза напряжения

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 достаточно принять поминутный контроль за уровнем несимметрии.

Тогда предлагаемый алгоритм управления параметрами СУ для 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 $K_{2(U)пор}$, которое выбирается так, чтобы в любой точке сети коэффициент несимметрии в нормальных режимах не превосходил допустимой величины $K_{2(U)доп} = 2\%$. Предварительный анализ показал, что пороговую величину коэффициента несимметрии, которую можно допустить в месте установки СУ, достаточно принять

$$K_{2(U)доп} \approx 0,3 \%$$

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

$$K_{2U}(t_0) > K_{2Uпор}, \quad (13)$$

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

$$K_{2U}(t_0) > K_{2Uпор}, \quad (14)$$

то на основе измеренных величин определяется режимный параметр согласно соотношениям (11), находятся по (12) и устанавливаются параметры СУ, которые обеспечивают полную компенсацию напряжения обратной последовательности согласно условиям (7).

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 холостого хода и определяются соответствующие напряжения прямой и обратной последовательности, которые согласно (8) представляют соответствующие ЭДС

$$\underline{E}_1 = \underline{U}_1, \quad \underline{E}_2 = \underline{U}_2. \quad (15)$$

Далее, установив на СУ номинальные проводимости во всех фазах, измеряют новые фазные напряжения и токи для СУ и рассчитывают

соответствующие симметричные составляющие. После чего находится входное сопротивление сети электроснабжения по одному из выражений

$$\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\underline{E}_1 - \underline{U}_1}{\underline{I}_1} \text{ или } \underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\underline{E}_2 - \underline{U}_2}{\underline{I}_2}. \quad (16)$$

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

Подчеркнем, что для реализации предложенного алгоритма управления параметрами СУ достаточно измерять комплексные величины фазных напряжений и токов в месте установки СУ и далее согласно (11, 12) вычислять необходимые параметры этого устройства. При этом следует контролировать величину входного сопротивления сети относительно места установки СУ. Контроль осуществляется единожды на межпоездном интервале, т.е. для БАМ не чаще, чем один раз за час.

Структурная схема САУ симметрирующим устройством. 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 11.

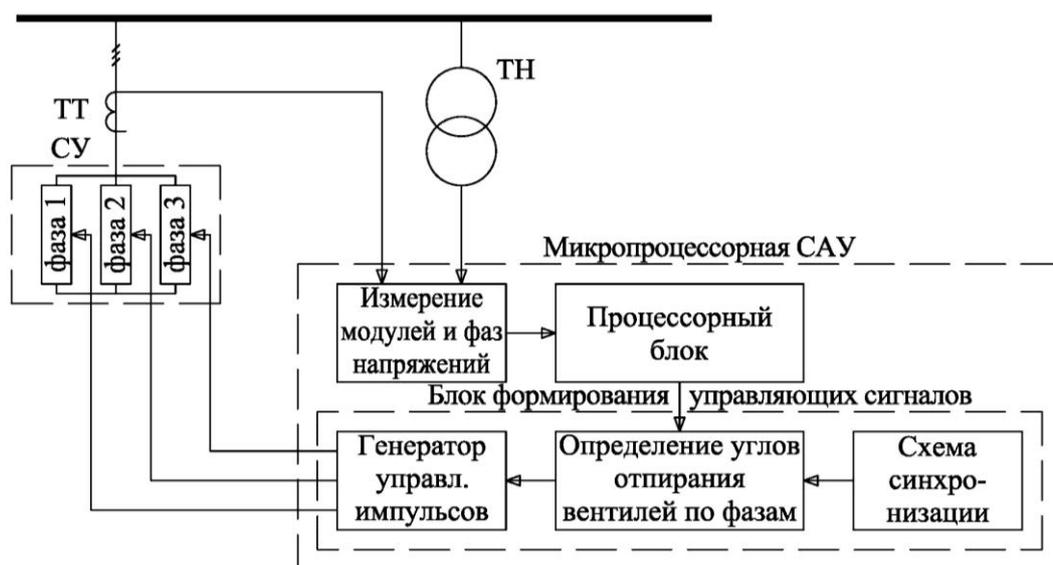


Рисунок 11 - Структурная схема микропроцессорной системы автоматического управления обобщенным симметрирующим устройством

Схема микропроцессорной САУ включает в свой состав процессорный блок и блок формирования управляющих сигналов. Процессорный блок выполняется на основе промышленной микропроцессорной элементной базы. Он осуществляет обработку цифровой информации, поступающей от векторного регистратора, согласно соотношениям (11, 12). В результате в блок формирования управляющих сигналов поступают данные о параметрах СУ (проводимости отдельных фаз), обеспечивающих допустимый уровень несимметрии в высоковольтной сети.

Блок формирования управляющих сигналов должен обеспечивать три основные функции. Первая функция состоит в синхронизации моментов открытия тиристорных вентилях. Она 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 вентилях независимо для каждой из фаз симметрирующего устройства.

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

Схема управляемого СУ на базе ТРГ и жестко подключенной конденсаторной батареи (КБ) показана на рисунке 12.

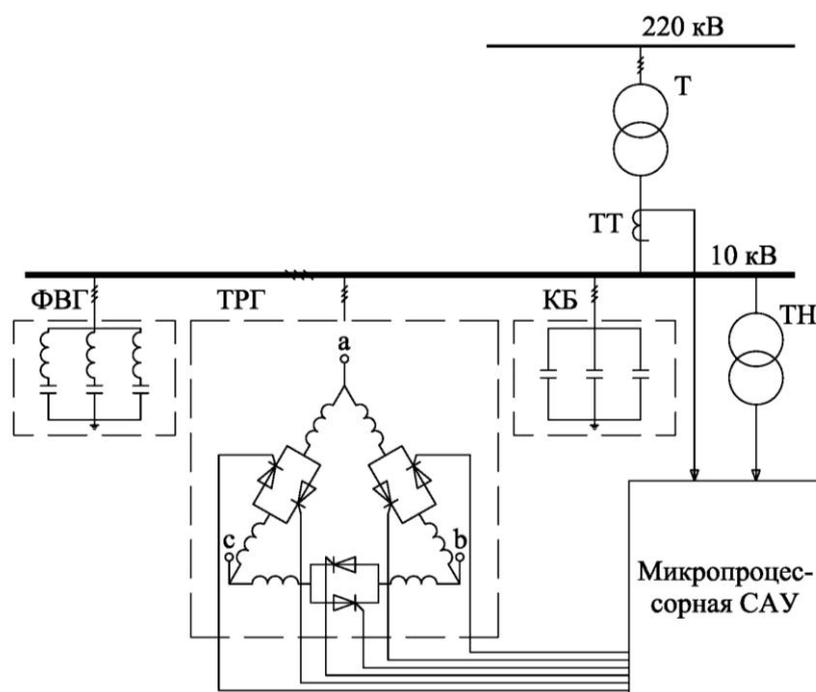


Рисунок 12 - Схема управляемого СУ на базе тиристорно–реакторной группы и некоммутируемой конденсаторной батареи

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

$$B_{CY} = B_{L_{max}} \div B_{C_{max}}, \quad (17)$$

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

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

$$B_L(\alpha) = -(|B_{L_{max}}| + |B_{C_{max}}|) \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right), \quad (18)$$

где α – угол отпирания тиристорного вентиля.

Тогда соответственно для проводимости СУ в целом имеем

$$B_{CY}(\alpha) = B_{C_{max}} + B_L(\alpha) \quad (19)$$

Недостатком рассмотренного регулируемого СУ является то, что мощность ТРГ должна не только обеспечивать работу фаз СУ в индуктивном режиме, но и компенсировать мощность постоянно подключенной КБ. Избавиться от этого недостатка можно за счет использования тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи.

Схема управляемого СУ на базе управляемого шунтирующего реактора (УШРП) и жестко подключенной конденсаторной батареи показана на рисунке 13. 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 13), представляющее трехфазную 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 емкостью устройства коррекции формы. Величина этого тока составляет (3–4) % номинального тока реактора.

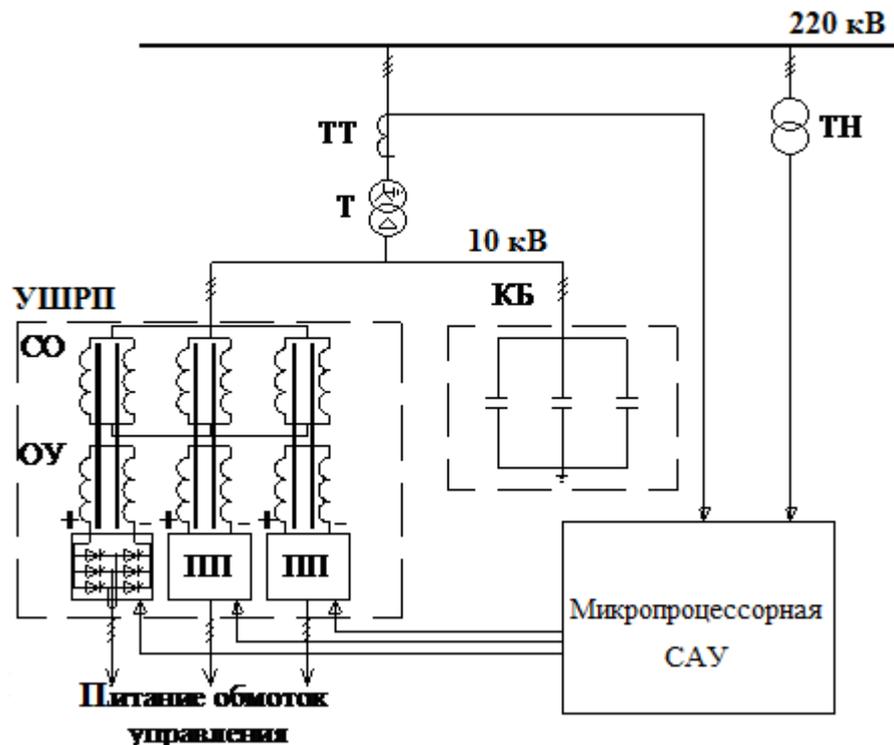


Рисунок 13 - Схема управляемого СУ на базе управляемого шунтирующего реактора с подмагничиванием и некоммутируемой конденсаторной батареи

При небольшом увеличении тока управления емкостная составляющая компенсируется и соответственно дальнейший рост тока управления переводит УШРП на работу в индуктивном режиме. Как и в случае СУ на базе ТРГ, проводимость СУ с использованием УШРП процессе управления должна изменяться в каждой фазе в диапазоне, определяемом соотношениями (11, 12).

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

$$B_L(i_y^*) = -(|B_{L_{max}}| + |B_{C_{max}}|)(i_y^* - 0,04), \quad (20)$$

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

Соответственно проводимость СУ в целом определится как

$$B_{CY}(i_y^*) = B_{C_{max}} + B_L(i_y^*). \quad (21)$$

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

$$i_y^* = i_y^*(\alpha) \quad (22)$$

Угол отпирания преобразователя меняется в диапазоне

$$\alpha_{xx} \leq \alpha \leq \alpha_n \quad (23)$$

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 (22) вырабатываются соответствующие управляющие импульсы, которые подаются на вентили преобразователей каждой фазы. Недостатком рассмотренного регулируемого

СУ, как и в случае СУ с ТРГ и постоянно подключенной КБ, является избыточная мощность УШРП, необходимая для компенсации мощности конденсаторной батареи. Этот недостаток исключается за счет использования тиристорно коммутируемой конденсаторной батареи.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований решен вопрос снижения несимметрии в протяженной 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 протяженных 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, оригинальные способы эквивалентирования и преобразования отдельных участков сети, а также расчетный алгоритм, основанный на линеаризации тяговой нагрузки.

2. Предложен метод определения пофазных параметров симметрирующих устройств основанный на использовании комплексных величин фазных напряжений в месте установки симметрирующих устройств при учете остальной сети входным сопротивлением, которое 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 определение параметров симметрирующего устройства, которые обеспечивают полную компенсацию напряжения обратной последовательности, а также контроль величины входного сопротивления сети относительно места установки симметрирующего устройства.

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. 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.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. **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.
2. **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.
- 3 **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.
4. **Анохин, Б.А.** Анализ расположения фаз двухцепной линии на основе уравнений в фазных координатах / Б.А. Анохин // XVII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» г. Томск, Секция 1 Электроэнергетика. 2011. С. 11-12
5. **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.
6. **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.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60 X 84/16, объем 1.5 п.л., тираж 100 экз.

заказ №1070 подписано в печать 25.04.2018 г.