

На правах рукописи



БУМЦЭНД Уянгасайхан

**РАЗВИТИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ  
(на примере электроэнергетической системы Монголии)**

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, профессор  
**Манусов Вадим Зиновьевич**

**Официальные оппоненты:** **Иванова Елена Васильевна**  
доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет водного транспорта», кафедра «Электроэнергетических систем и электротехники», заведующий

**Осипов Дмитрий Сергеевич**  
кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск

Защита диссертации состоится «11» октября 2018 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации [http://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya\\_uyangasaiyhan\\_bumcend\\_152887\\_753086.pdf](http://www.nstu.ru/files/dissertations/dissertaciya_uyangasaiyhan_bumcend_152887_753086.pdf)

Автореферат разослан «\_\_\_» июля 2018 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,



Анастасия Георгиевна Русина

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** С развитием железнодорожного транспорта, в соответствие с современными требованиями к скоростным железным дорогам, они электрифицируются на переменном токе напряжением 25-27,5 кВ, как это принято для скоростных железных дорог Юго-Восточной Азии: в Японии, Китае, Южной Корее.

В связи с тем, что тяговые подстанции железных дорог переменного тока используют только две фазы из трех фаз питающих сетей, возникает проблема электромагнитной совместимости тяговой системы электроснабжения с другой частью электроэнергетической системы. Задача электромагнитной совместимости включает в себя необходимость решения проблемы возникновения несимметричных режимов в трехфазной электрической сети, обусловленных присоединением тяговых электрических нагрузок.

Несимметричные режимы ухудшают качество электрической энергии, снижают эффективность функционирования электроэнергетических систем и делают ее менее стабильной. При этом несимметрия токов уменьшает пропускную способность питающих трехфазных сетей, снижает технико-экономические показатели синхронных генераторов и трансформаторов, увеличивает потери активной мощности и электроэнергии. Несимметрия напряжений уменьшает мощность выпрямительных установок, снижает эффективность использования регулирующих устройств, негативно влияет на промышленные электроприемники и бытовую технику, уменьшая срок и ресурс их эксплуатации, а также приводит к ложной работе некоторых видов релейной защиты.

Аналогичные проблемы возникают в связи с необходимостью электрификации железнодорожной магистрали Монголии с учётом строительства второго железнодорожного пути взамен однопутной железной дороги на тепловозной тяге. Это обусловлено стремлением создать кратчайший путь транспортного железнодорожного коридора, связывающего Европу и Азию, через территорию Монголии, так как ее географическое положение таково, что Улан-Баторская железная дорога представляет собой кратчайший путь для грузоперевозок и товарообмена.

Таким образом, проблема улучшения качества электрической энергии и симметрирования режимов существует и требует разработки новых моделей и методов для анализа несимметричных режимов. Необходимо исследование возможности симметрирования режимов в трехфазной сети на первичной стороне высокого напряжения путем выравнивания токов в плечах на вторичной стороне низкого напряжения тяговых трансформаторов со специально соединенными схемами.

Данная диссертационная работа направлена на исследование взаимодействия системы тягового электроснабжения с электрической сетью электроэнергетических систем (ЭЭС). Все вышесказанное определяет актуальность выбранной темы исследования.

### **Степень разработанности темы исследования.**

Исследование влияния тяговых систем электроснабжения на режимы работы ЭЭС привлекало внимание ученых с момента создания первых электрифицированных железных дорог в мире.

Существенный вклад в изучение вопросов качества электроэнергии и его повышения, улучшения режимов работы электрических сетей и систем тягового электроснабжения внесли К.Г. Марквардт, Р.Р. Мамошин, Б.М. Бородулин, Н.А. Мельников, В.И. Пантелеев, В.И. Горюнов, Г.Н. Ворфоломеев, Г.И. Самородов, Н.Н. Харлов, В.Т. Черемисин, В.Г. Сальников, В.К. Федоров, Е.В. Иванова, В.Г. Курбацкий, В.П. Закарюкин, А.В. Крюков, И.И. Надтока, В.П. Довгун, Д. Содномдорж, Р. Ciufo, U. Jayatunga.

Однако в их исследованиях уделено недостаточно внимания возможности симметрирования режимов при различных трансформаторных соединениях в точке присоединения тяговой сети. В этих работах исследовались режимы с однофазными или трехфазными трансформаторами.

В настоящей работе симметрирование режимов в трехфазной питающей сети при присоединении тяговой нагрузки с помощью трансформатора Скотта переносится с первичной стороны высокого напряжения на вторичную сторону напряжения 25 кВ.

**Цель работы.** Определение мер обеспечения качества функционирования электроэнергетической системы при присоединении тяговой нагрузки (на примере электроэнергетической системы Монголии).

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

- установить граничные условия грузооборота, при котором целесообразен переход на электрическую тягу 2х25 кВ;
- обосновать схему присоединения тяговых нагрузок к электроэнергетической системе;
- выбрать и обосновать переход на систему тягового электроснабжения однофазного переменного тока 50Гц, 2х25 кВ с исследованием способностей симметрирования различных видов трансформаторного присоединения;
- определить условия и исследовать режимы распространения несимметрии напряжений, обусловленной электрической тягой;
- выполнить оптимизацию режимов ЭЭС с дефицитом реактивной мощности;
- выполнить моделирование трансформаторных соединений для условий неравенства загрузки двух плеч трансформатора;
- исследовать влияния коэффициента несимметрии по обратной последовательности на величину потерь активной мощности в сети;
- дать технико – экономическую оценку разработанных мероприятий.

**Объект исследования.** Трехфазные электрические сети электроэнергетических систем, имеющих присоединение системы тягового электроснабжения на переменном токе с числом фаз, не кратным трем.

**Предмет исследований.** Несимметричные режимы в трехфазной питающей электрической сети и их симметрирование на стороне тягового напряжения с учетом дефицита реактивной мощности в системе.

**Методы исследований.** В работе используются методы математического моделирования несимметричных нагрузок и оптимизация режимов электрических сетей по реактивной мощности с помощью алгоритма роевого интеллекта.

### **Научная новизна работы:**

1. Выведены уравнения связи между параметрами первичной и вторичной сторон трансформатора, позволяющие оценить симметрирующие способности основных видов трансформаторных присоединений тяговой системы электропитания, с числом фаз, не кратным трем.

2. Показано, что коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности в узлах радиальной электрической сети может быть представлен в виде совокупности коэффициентов несимметрии от электропотребителя, линии и источников питания.

3. Доказана способность определения глобального минимума потерь активной мощности при оптимизации режима с помощью метода роя частиц.

4. Разработана математическая модель несимметричной нагрузки в расчетах потерь активной мощности при несимметричных режимах в сложной электрической сети.

### **Практическая значимость и реализация результатов:**

1. Установлены граничные условия перехода электрической тяги в АО УБЖД на напряжение переменного тока 2х25 кВ и определена необходимая дополнительная активная мощность в электроэнергетической системе Монголии для обеспечения растущего объема грузоперевозок.

2. Установлена зависимость влияния коэффициента несимметрии по обратной последовательности на величину дополнительных потерь активной мощности в электрической сети ЭЭС для случая присоединения тяговых нагрузок через трехфазный трансформатор и трансформатор Скотта.

3. Разработаны два сценария развития Монгольской электроэнергетической системы в зависимости от точки присоединения системы тягового электроснабжения.

4. Результаты работы используются при проектировании и в процессе электрификации железнодорожной магистрали Улан-Баторской железной дороги Монголии. Разработанные в диссертационной работе подходы рассматриваются в дисциплинах кафедры систем электроснабжения предприятий «Оптимизация систем электроснабжения» и «Моделирование в электроэнергетике» Новосибирского государственного технического университета.

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность результатов и выводов, полученных в диссертационной работе, подтверждается корректным использованием положений теоретических основ электротехники, теории электромагнитных процессов и устойчивости ЭЭС, методов оптимизации, а также теории матриц. Имитационное моделирование уравнений трансформаторных соединений в среде программно-вычислительного комплекса (ПВК) Matlab позволило получить коэффициенты несимметрии, адекватно совпадающие с теоретическими предпосылками.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует следующим пунктам Паспорта специальности 05.14.02 – «Электрические станции и электроэнергетические системы»:

1. пункт 6 – Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике;

2. пункт 12 – Разработка методов контроля и анализа качества электроэнергии и мер по его обеспечению;

3. пункт 13 – Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Эффективность симметрирования режимов в трехфазной электрической сети с помощью трансформаторных присоединений электропотребителей, с числом фаз, не кратным трем.

2. Математическая модель несимметричной электрической сети, позволяющая адекватно учитывать вклады отдельных элементов сети в несимметрию в точке общего присоединения.

3. Определение глобального минимума при оптимизации режимов по реактивной мощности с помощью метода роя частиц.

4. Математическая модель электрической сети с несимметричной нагрузкой.

5. Зависимость дополнительных потерь активной мощности в трехфазной электрической сети от коэффициента несимметрии по обратной последовательности.

6. Технико-экономическое обоснование целесообразности применения трансформатора Скотта с трехфазным трансформатором.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях, научных семинарах и молодежных конференциях:

- Первый международный исследовательский семинар «Тенденции развития энергетики и информационных технологий» – 28 октября 2015 года г. Улан-Батор, Монголия;

- Международный форум «IFOST-2016» 11th International Forum on Strategic Technology, 1-3 июня 2016 года, г. Новосибирск;

- Второй международный исследовательский семинар «Тенденции развития энергетики и информационных технологий» – 3 июня 2016 года г. Новосибирск;

- X Всероссийская научная конференция молодых ученых «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ» 05 – 09 декабря 2016 года г. Новосибирск;

- «Молодежь. Наука. Технологии» (МНТК-2017) – 18-20 апреля 2017 года г. Новосибирск;

- International Conference on Sustainable Cities (ICSC 2018). Moscow, Russia, 18 May, 2018;

- Международный форум «IFOST-2018» 13th International Forum on Strategic Technology, 30 мая 2018 - 1 июня 2018 г. Харбин (Китай).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликованы 7 печатных работ, в том числе 4 работы в рецензируемых изданиях из перечня рекомендованных ВАК Российской Федерации, 1 работа включена в наукометрическую базу SCOPUS и 2 работы в прочих изданиях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего в себя 120 библиографических ссылок и двух приложений. Общий объем работы составляет 186 страниц, включая 46 Таблиц и 51 Рисунок.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическое значение работы, перечислены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен исторический экскурс и дан анализ современного состояния и прогноз развития электроэнергетической системы Монголии и Акционерного Общества «Улан-Баторская железная дорога» (АО УБЖД), также представлен обзор современных систем тягового электроснабжения.

Используя богатые геологические запасы угля, которые составляют более 150 млрд тонн, Монголия может существенно расширить свое производство электроэнергии. В связи с экономическим развитием в городах Улан-Батор, Дархан и Эрдэнэт, а также последовательного подключения отдаленных районов к централизованным системам электроснабжения, потребление электроэнергии возрастает в среднем на 5 – 8 % в год, и предполагается, что этот рост продолжится. Монгольское правительство сознает наличие острой потребности в инвестициях модернизации системы и строительства электростанций.

По исследованиям Министерства минеральных ресурсов и энергетики Монголии, в период с 2018 по 2025 г. национальная потребность в электрической мощности может составить от 1400 до 2400 МВт, в то время как одновременно возрастет выработка электроэнергии. Из Рисунка 1 видно, что к 2025 году генера-

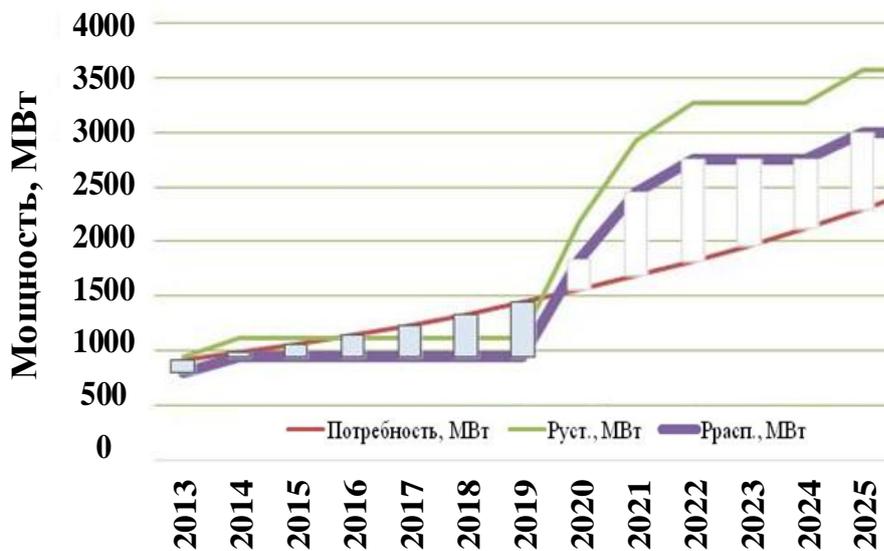


Рисунок 1 – Тенденция производства и распределения электроэнергии

ция энергии будет составлять около 3000 МВт и превышать электропотребление на 600 МВт. При этом в прогнозе учтена однопутная железная дорога по системе 1х25 кВ, которая будет потреблять 400 МВт.

Таким образом, Монгольская ЭЭС увеличивает объем выработки электроэнергии.

Акционерное Общество «Улан-Баторская железная дорога» (АО УБЖД) – это совместное Российско-Монгольское предприятие с 50 %-ным участием с каждой стороны, которая является единственной железнодорожной компанией и выполняет 70 % грузовых перевозок Монголии. Крупнейшей линией Монголии является магистраль Сухэбатор – Улан-Батор - Замын-Удэ, ее протяженность составляет 1111 км. Благодаря постройке этой магистрали железнодорожный путь из Европы в Центральную Азию сократился на 1025 км.

В настоящее время научными исследованиями Института экономики и развития транспорта прогнозирован рост грузооборота АО УБЖД по трем возможным сценариям развития. Как показано на Рисунке 2, грузооборот по центральной железнодорожной магистрали АО УБЖД в последние годы увеличивается и может достигнуть 34,6 – 73,7 млн тонн в год. Растущий с каждым годом торговый оборот соседних двух стран и стран Европы и Азии требует от Монгольского государства иметь структуру транспорта, ускоряющую пассажирские и грузовые перевозки, а также с низкой конкурентоспособной стоимостью транспортировки.

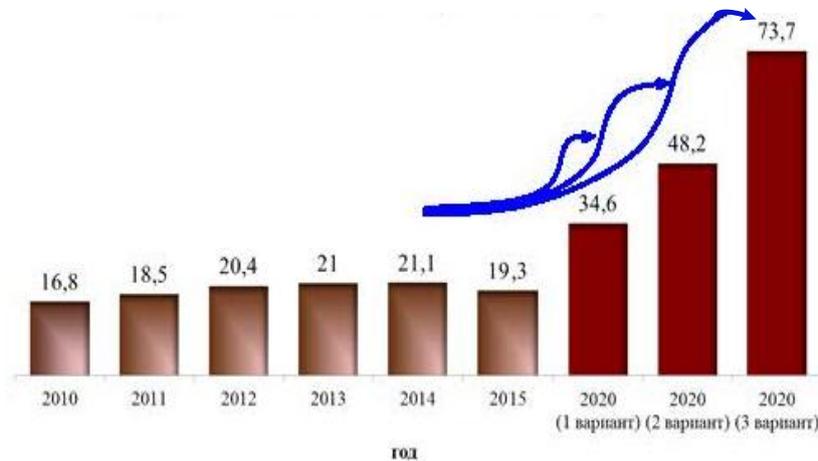


Рисунок 2 – Перспективы роста грузоперевозок АО УБЖД

1. Для развития сотрудничества с соседними странами.
2. Увеличить рентабельность транспортного коридора, соединяющего Азию и Европу и проходящего по территории Монголии.
3. Создать экономически эффективную железнодорожную перевозку с современными технико-технологическими решениями.

Внедрению той или иной системы тягового электроснабжения предшествовало или сопутствовало их технико-экономическое (ТЭ) обоснование. Были выполнены в этой области исследования научными организациями и фирмами ряда стран. Многочисленные исследования подтверждают наличие для каждой железнодорожной линии критического значения грузооборота, выше которого становится ТЭ оправданным применение электрической тяги. Эффективность любой системы тягового электроснабжения оценивается по-разному в зависимости от местных условий каждой страны.

**Во второй главе** автором предложена зависимость электропотребления электроподвижным составом от объема грузоперевозок (Рисунок 3). В свою очередь, выбор системы тягового электроснабжения позволяет определить мощность, которую необходимо установить на станциях ЭЭС Монголии для поддержания баланса активной мощности. Соответствующим образом увеличивается потребляемая мощность, которая на заключительном этапе электрификации 2х25 кВ, составит дополнительно к необходимой мощности 800 МВт, а в случае одного пути потребуется 400 МВт.

государства иметь структуру транспорта, ускоряющую пассажирские и грузовые перевозки, а также с низкой конкурентоспособной стоимостью транспортировки.

В связи с этим в ближайшее время Монголия планирует электрифицировать железную дорогу. Обоснование электрификации железной дороги состоит из трёх основных условий:

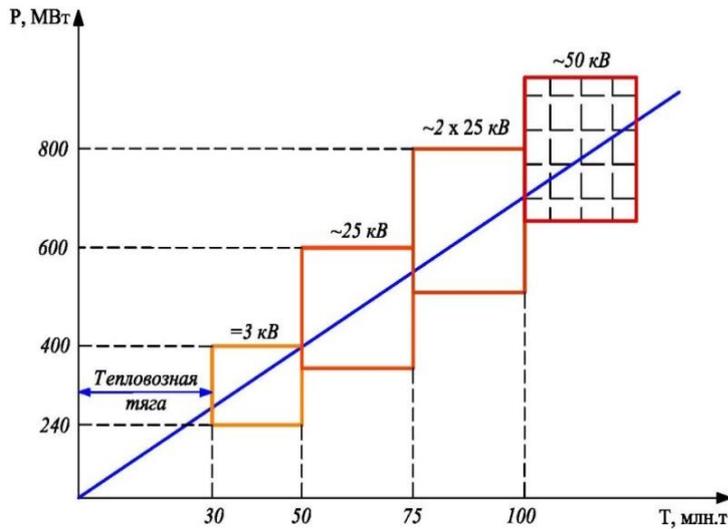


Рисунок 3 – Выбор системы тягового электроснабжения по оптимальной энергетической эффективности

Одной из характерных особенностей системы тягового электроснабжения является двухфазная система электроснабжения, которая неизбежно создает несимметрию токов и напряжений в питающих сетях.

Международным стандартом IEC TR 61000-3-13 предложен упрощенный метод оценки влияния несимметрии (НС) для потребителей с малой мощностью: то есть это отношение мощности однофазного потребителя к мощности трехфазного короткого

замыкания данного узла энергосистемы.

$$\frac{S_{номр}}{S_{КЗ(3ф)}} \leq 0,2\% , \quad (1)$$

где  $S_{номр}$  – мощность однофазного потребителя;  $S_{КЗ(3ф)}$  – мощность трехфазного короткого замыкания в точке общего присоединения.

Если указанное условие выполняется, то нет необходимости рассматривать далее, и можно присоединить в сеть нового электропотребителя (ЭП). Если указанное условие не выполняется, то необходимо исследовать несимметрию при присоединении нового ЭП путем суммирования полученных вкладов НС от каждого индивидуального ЭП, присоединенного к этому узлу, называемого точкой расчета. Для условия нашей задачи, в которой рассматривается электрификация северной части железнодорожной магистрали АО УБЖД, эти показатели приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Отношение мощности однофазного потребителя к мощности трехфазного короткого замыкания узла

| Тяговые подстанции            | Сухбаатар | Дархан | Зуунхараа | Толгойт |
|-------------------------------|-----------|--------|-----------|---------|
| $S_{нагр}$ , МВА              | 10,81     | 99,31  | 99,31     | 42,72   |
| $S_{КЗ(3ф)}$ , МВА            | 726       | 1470   | 737       | 3016    |
| $\frac{S_{номр}}{S_{КЗ(3ф)}}$ | 1,40%     | 6,75%  | 13,47%    | 1,41%   |

Видно, что указанное выше условие по стандарту МЭК не выполняется во всех узлах присоединения тяговых подстанций. То есть потребуется принятие мер по снижению НС для питания новых потребителей.

Для решения проблемы несимметрии напряжений и токов из-за неуравновешенных тяговых нагрузок в работе были проанализированы схемы различных трансформаторных присоединений с целью определения “симметрирующей способности” каждого из них при питании нагрузок, с числом фаз не кратным трем:

- однофазный;
- открытый треугольник/ открытый треугольник (V/V);
- звезда / треугольник (Y/Δ);
- треугольник / треугольник (Δ/Δ);
- Скотт;
- Ле Бланк.

На основе метода симметричных составляющих выполнены расчеты коэффициента несимметрии по обратной последовательности, так как он играет наиболее существенную роль в сетях питающих тяговую нагрузку.

Выведены уравнения симметричных составляющих в матричном виде, представляющие двухфазную тяговую нагрузку и трехфазную питающую сеть. После преобразования соотношения токов и напряжений группируем по симметрирующей способности все рассмотренные виды трансформаторных соединений в три группы.

Таким образом, путем объединения полученных уравнений эквивалентной схемы соответственно, определены напряжения прямой и обратной последовательностей, с помощью которых определены коэффициенты несимметрии трансформаторных схем соединений (Таблица 2).

Таблица 2 - Коэффициенты несимметрии при различных схемах тягового электроснабжения

| Соединение трансформатора | Коэффициент несимметрии по напряжению, %                                      |
|---------------------------|---|
| Одна фаза                 | $k_{2U} = \frac{S_{1\phi}}{S_{K3(3\phi)}} \cdot 100$                          |
| Скотт                     | $k_{2U} =  1 - 2k_3  \frac{S_{1\phi}}{S_{K3(3\phi)}} \cdot 100$               |
| Ле Бланк                  |   |
| Вудбридж                  |   |
| V/V                       | $k_{2U} = \sqrt{3k_3^2 - 3k_3 + 1} \frac{S_{1\phi}}{S_{K3(3\phi)}} \cdot 100$ |
| Y/Δ                       |   |
| Δ/Δ                       |   |

где  $k_3$  - коэффициент загрузки двух плеч питания тяги, определяющий распределение нагрузки в двух плечах, как  $S_{H1} = k_3 \cdot S_{1\phi}$ ,  $S_{H2} = (1 - k_3) \cdot S_{1\phi}$ , зависящий от графика движения поездов.

Преимущество этих формул заключается в том, что они дают быстрый и простой способ вычисления максимального коэффициента несимметрии в точке общего присоединения.

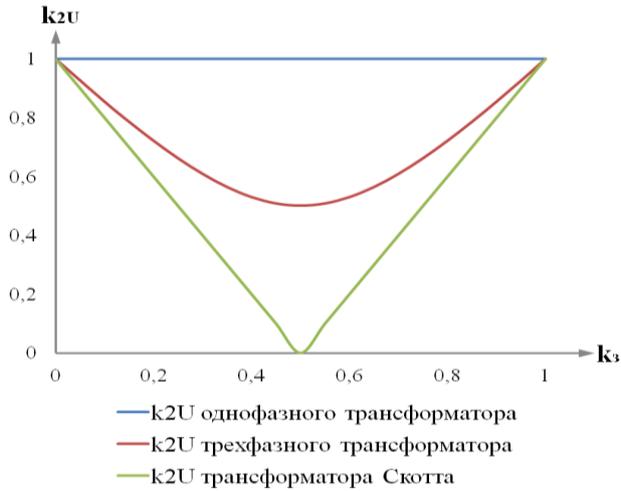


Рисунок 4 – Изменение коэффициента несимметрии в зависимости от загрузки двух плеч трансформатора

Сравнительный график коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности трансформаторных соединений в зависимости от загрузки двух плеч тяговой подстанции представлен на Рисунке 4.

Из рисунка видно, что при равенстве нагрузок в плечах питания тяги, симметрирующие трансформаторы обеспечивают симметрию напряжений и токов в трехфазной питающей сети.

Трансформатор Скотта является одним из наиболее известных типов трансформаторов, используемых с целью снижения несимметрии напряжения. Он состоит из двух однофазных трансформаторов, соединенных специальным образом, как показано на Рисунке 5, где также приведена его векторная диаграмма. Он преобразовывает симметричную трехфазную систему в двухфазную с ортогонально направленными напряжениями и наоборот. Важно отметить, что если токи во вторичной цепи в двух плечах равны, то линейные токи в трехфазной сети также будут симметричными.

Таким образом, обычная задача симметрирования напряжения в трехфазной сети переносится из сети высокого напряжения 110-220 кВ в сеть 25 кВ, путем выравнивания мощностей нагрузки в двух плечах тягового электроснабжения. При этом сама задача симметрирования тоже упрощается, так как необходимо симметрировать не три фазы, а две.

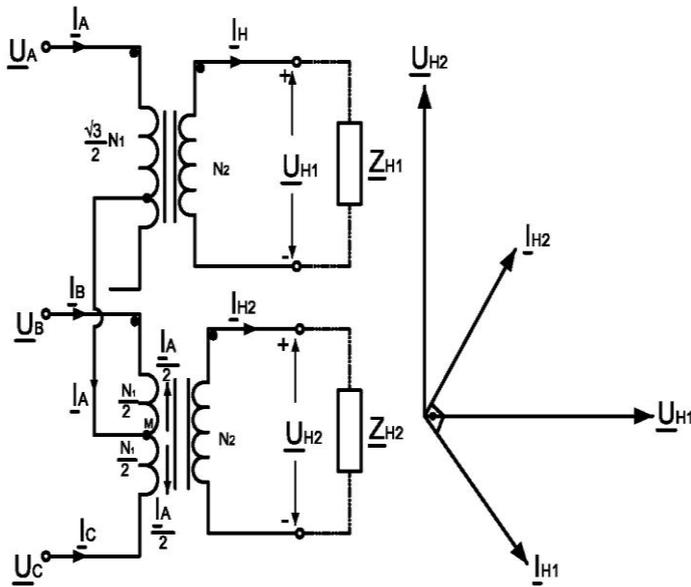


Рисунок 5 – Схема соединения трансформатора Скотта и его векторная диаграмма

две.

По формулам, приведенным выше, были определены коэффициенты НС токов и напряжений по обратной последовательности трехфазного трансформатора

и трансформатора Скотта при одной и той же суммарной потребляемой мощности тяговой нагрузки, но изменяющиеся в двух плечах. Ниже представлена графическая интерпретация коэффициентов  $k_{2I}$  и  $k_{2U}$  (Рисунок 6).

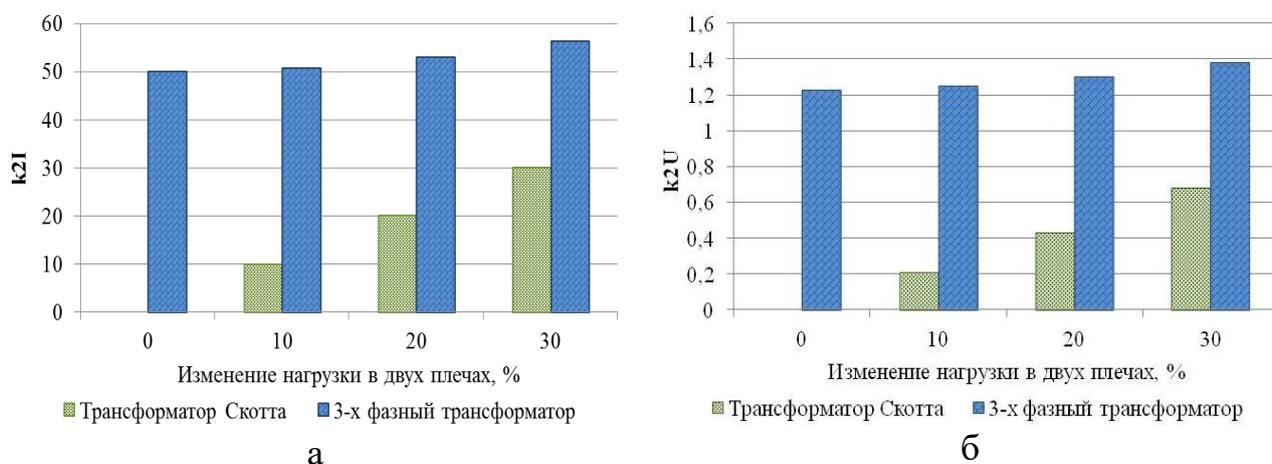


Рисунок 6 – Соотношение влияния тяговой нагрузки на коэффициент несимметрии а. - по току, б. - по напряжению, в трехфазной питающей сети при присоединении к ней через трехфазный трансформатор и трансформатор Скотта

Для ПКЭ, характеризующих несимметрию напряжений обратной последовательности трехфазной системы напряжений, в ГОСТ 32144-2013 установлены следующие нормы:

- значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $k_{2U}$  в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин., не должно превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю;
- значение коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности  $k_{2U}$  в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин., не должно превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

По стандарту Международной Электротехнической Комиссии (МЭК) установлены следующие нормы для коэффициентов несимметрии (Таблица 3).

Таблица 3 – Значения коэффициентов несимметрии по напряжению стандарта МЭК (IEC TR 61000-3-13)

| Уровень напряжения | Напряжение, кВ    | Норма $k_{2U}$ , % |
|--------------------|-------------------|--------------------|
| Низкое             | $U \leq 1$        | 2*                 |
| Среднее            | $1 < U \leq 35$   | 1,8                |
| Высокое            | $35 < U \leq 230$ | 1,4                |
| Сверхвысокое       | $230 < U$         | 0,8                |

\*В сети, где в основном однофазные потребители допускается коэффициент несимметрии – 3%.

Таким образом, можно сделать вывод, что предельно допустимое значение 4% по ГОСТ 32144-2013 является завышенным, так как исследования многих ав-

торов доказывают значительное негативное влияние на асинхронные двигатели и электробытовые приемники уже при значении коэффициента несимметрии в 1,2-1,5%. По-видимому, целесообразно установить предельное значение на уровне 2%.

Стандарт МЭК рекомендует учитывать вклады несимметрии в точке общего присоединения отдельно от каждого элемента сети. Важным аспектом подхода МЭК по определению НС является учет уже присущей несимметрии энергосистемы, созданной из-за нетранспонированной линии, а также влияния других присоединенных нагрузок выше и ниже по течению мощности. Для определения индивидуальных вкладов НС в рассматриваемой точке расчета используется свойство линейности переменных обратной последовательности. Таким образом, коэффициент НС получаем как векторное суммирование в виде показанном на Рисунке 7.

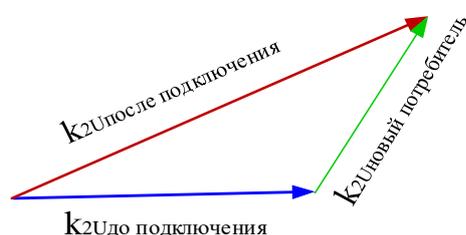


Рисунок 7 – Вектор несимметрии напряжения

Следуя этой рекомендации, коэффициент НС представлен в виде совокупности компонентов отдельных вкладов: от источника питания (ИП), от линии электропередачи (ЛЭП) и от электропотребителя. Теоретические основы рассматриваются для радиальной сети. Сопротивления линии и нагрузки представляются в виде матриц собственных и взаимных сопротивлений. Предполагается, что все измерения напряжения до или после подключения в точке расчета получаются в виде синхронизированных векторных

величин.

При симметричном источнике питания НС в точке расчета возникнет в результате несимметрии нагрузки и несимметрии линии.

$$k_{2U_{т.р.}} = \frac{Z_{21.к}}{Z_{11.к}} \frac{U_{\underline{д.отклн}}}{(1 + U_{\underline{д.отклн}})} - \frac{Z_{21.ЛЭП}}{Z_{11.ЛЭП}} \frac{U_{\underline{д.отклн}}}{(1 + U_{\underline{д.отклн}})}, \quad (2)$$

где  $U_{\underline{д.отклн}}$  – действительное отклонение напряжения, которое равно отношению прямой последовательности падения напряжения на ЛЭП к напряжению прямой последовательности в конце ЛЭП, определяемое как

$$U_{\underline{д.отклн}} = \frac{U_{1.ЛЭП}}{U_{1.к}} = \frac{Z_{11.ЛЭП}}{Z_{11.к}} = \frac{Z_{22.ЛЭП}}{Z_{11.к}}, \quad (3)$$

в данном случае  $Z_{11.к} = Z_{11.нагр}$ .

При несимметричном источнике питания уравнение может быть записано тремя компонентами, как

$$k_{2U_{т.р.}} = k_{2U_{ист}} + \frac{Z_{21.к}}{Z_{11.к}} \frac{U_{\underline{д.отклн}}}{(1 + U_{\underline{д.отклн}})} - \frac{Z_{21.лэп}}{Z_{11.лэп}} \frac{U_{\underline{д.отклн}}}{(1 + U_{\underline{д.отклн}})}, \quad (4)$$

где  $k_{2U_{ист}} = k_{2U_{до подключения}}$  – коэффициент НС источника питания, определяемый с помощью измерений до подключения в точке расчета.

Согласно уравнению, несимметрия источника питания переносится в точку расчета без ослабления.

Для верификации предлагаемого метода суммирования коэффициента НС использовали ППК Matlab, с помощью которого смоделировали радиальную сеть с несимметричной нагрузкой пассивного типа. Достоверность и корректность, разработанной математической модели были определены путем сравнения измеренных и рассчитанных значений  $k_{2U}$  в узлах сети. В Таблице 4 представлен пример расчета достоверности результатов моделирования.

Таблица 4 - Верификация математической модели и ее погрешности

| Измеренные величины $k_{2U}$              | Результат по математической модели $k_{2U}$ | Абсолютная погрешность   | $\frac{e_t}{y_t}$ | Квадратичное отклонение | $\frac{ e_t }{y_t}$ |
|---|---|--------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------|
|   |   |                          |                   | $(e_t)^2$               |                     |
| $y_t$                                     | $y_{t(sim)}$                                | $e_t = y_t - y_{t(sim)}$ |                   |                         |                     |
| 0,981                                     | 0,953                                       | 0,027                    | 2,75%             | 0,00073                 | 2,75%               |
| 1,640                                     | 1,583                                       | 0,056                    | 3,43%             | 0,00317                 | 3,43%               |
| 2,062                                     | 2,028                                       | 0,033                    | 1,64%             | 0,00114                 | 1,64%               |
| 2,656                                     | 2,590                                       | 0,066                    | 2,48%             | 0,00436                 | 2,48%               |
| Показатели                                |   |                          |                   | Значение                |                     |
| Средняя абсолютная погрешность            |   |                          |                   | 0,046                   |                     |
| Средняя процентная погрешность            |   |                          |                   | 2,83%                   |                     |
| Среднеквадратичное отклонение             |   |                          |                   | 0,048                   |                     |
| Средняя абсолютная процентная погрешность |   |                          |                   | 2,58%                   |                     |

Расчет с помощью предложенной математической модели показал, что средняя абсолютная процентная погрешность не превысила значения 5%.

Определение вкладов НС позволяет определить новые значения  $k_{2U}$ . Для лица, принимающего решения о подключении новых ЭП, эти новые коэффициенты  $k_{2U}$  могут послужить основанием для отказа в присоединении новых электропотребителей.

**В третьей главе** проведена оптимизация режимов электрической сети по реактивной мощности и дан сравнительный анализ градиентного метода и метода роевого интеллекта (алгоритм роя частиц).

В связи с электрификацией рассмотрены приоритетные два сценария возможного развития Монгольской ЭЭС в зависимости от присоединения системы тягового электроснабжения. Первый сценарий состоит в том, что четыре опорных тяговых подстанций северной части железной дороги будут подсоединены к узлам ЭЭС Монголии на напряжение 110 кВ, второй сценарий - на напряжении 220 кВ.

Одной из задач оптимизации является выбор метода, позволяющего из множества допустимых решений выбрать такие, при которых значения управляемых параметров удовлетворяют заданным ограничениям и обращают в максимум или минимум целевую функцию.

Сущность метода градиента, используемого при нахождении минимума целевой функции, состоит в том, чтобы, начиная с начального приближения неизвестных, перейти к первому приближению, затем ко второму и последующим, следовательно, чтобы целевая функция убывала при переходе к каждому следующему приближению. Наискорейшее приближение к минимуму целевой функции на каждой итерации зависит от выбранной оптимальной длины шага.

Роевой интеллект включает в себя множество разнообразных алгоритмов. В данной работе использовали алгоритм роя частиц. Сущность метода заключается в перемещении частиц в пространстве решений. Каждая из частиц в отдельный момент времени может характеризоваться параметром из области решений (координатами точки в пространстве решений) и значением оптимизируемой целевой функции. В качестве связи между частицами используется так называемая общая память, благодаря которой каждая частица знает координаты наилучшей точки среди всех остальных, в которых была любая частица роя. В результате на движение частицы влияют стремление к своему наилучшему положению, стремление к наилучшему среди всех частиц положению, инерционность и случайные отклонения. Результаты оптимизации приведены в Таблице 5.

Таблица 5 - Сравнительный анализ методов градиента и роевого интеллекта

| Сценарий | № | Кол-во узлов | Рекомендуемая мощность КУ, МВАр |                  | Потери в сети $\Delta P$ , МВт |                  |
|----------|---|--------------|---------------------------------|------------------|--------------------------------|------------------|
|          |   |              | Градиентный метод               | Метод роя частиц | Градиентный метод              | Метод роя частиц |
|          |   |              | 1                               | 10               | 80,10                          | 69,42            |
|          |   | 5            | 72,19                           | 69,09            | 45,73                          | 45,33            |
| 2        | 8 | 33,72        | 40,59                           | 36,51            | 36,48                          |                  |
|          | 4 | 44,08        | 43,86                           | 36,65            | 36,29                          |                  |

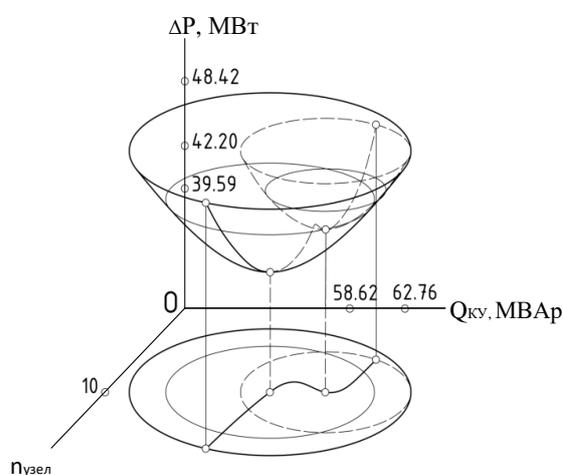


Рисунок 8 – Глобальный минимум целевой функции  $\Delta P$ , МВт

В итоге метод роя частиц показал, что мощность устанавливаемых компенсирующих установок может быть меньше (43,86 МВАр), при этом потери мощности в сети также несколько ниже, чем показал метод градиента (36,29 МВт). Графическая интерпретация сравнения результатов приведена на Рисунке 8.

**Четвертая глава** посвящена разработке алгоритма расчета установившихся режимов сетей, питающих тяговую несимметричную нагрузку. Существуют программные

комплексы для расчета несимметричных режимов, однако нет алгоритмов, позволяющих учитывать в таких расчетах и несимметричность сети одновременно с несимметричной нагрузкой.

Для этого необходимы математические модели соответствующих элементов сети относительно фазных переменных. В трехфазных линиях напряжения и токи в линии связаны известными телеграфными уравнениями. Уравнения трехфазной симметричной линии имеют вид

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= L \frac{\partial i}{\partial t} + Ri; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C \frac{\partial u}{\partial t} + Gu, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Для несимметричной линии данные уравнения получены в виде матриц-столбцов следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \underline{U} &= e^{-\gamma_u x} \cdot \underline{A} + e^{\gamma_u x} \cdot \underline{B}; \\ \underline{I} &= e^{-\gamma_i x} \cdot \underline{C} + e^{\gamma_i x} \cdot \underline{D}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $e^{\gamma x}$  – матричная экспонента;  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  – постоянные векторы-столбцы размерностью  $m \times 1$ , вычисляемые из граничных условий;  $m$  – число проводов;  $\gamma_u$  и  $\gamma_i$  – комплексные квадратные матрицы размерностью  $m \times m$ , представляющие собой соответствующие функции от матриц собственных и взаимных погонных сопротивлений и проводимостей проводов определяются

$$\left. \begin{aligned} \gamma_u &= \sqrt{\underline{Z}_0 \cdot \underline{Y}_0} \\ \gamma_i &= \sqrt{\underline{Y}_0 \cdot \underline{Z}_0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Используя уравнения линии, можно получить связь матриц  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  с матрицами векторов-столбцов комплексных напряжений и токов размерностью  $m \times 1$  в начале и конце линии

– в начале линии

$$\left. \begin{aligned} -\underline{Z}\underline{I}_n &= -\gamma_u \cdot \underline{A} + \gamma_u \cdot \underline{B}; \\ -\underline{Y}\underline{U}_n &= -\gamma_i \cdot \underline{C} + \gamma_i \cdot \underline{D}; \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

– в конце линии

$$\left. \begin{aligned} -\underline{Z}\underline{I}_k &= -\gamma_u e^{-\gamma_u l} \cdot \underline{A} + \gamma_u e^{\gamma_u l} \cdot \underline{B}; \\ -\underline{Y}\underline{U}_k &= -\gamma_i e^{-\gamma_i l} \cdot \underline{C} + \gamma_i e^{\gamma_i l} \cdot \underline{D}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для формализации математической модели (6, 9) преобразуем ее к виду, удобному для разделения параметров режима на зависимые и независимые режимные параметры. Данная процедура включает несколько этапов:

1. Определяются векторы - столбцы  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$  путем решения системы матричных уравнений, записываемой на основе первого уравнения системы (6) для  $x$  соответствующего началу и концу линии

$$\begin{aligned}\underline{U}_H &= \underline{A} + \underline{B}; \\ \underline{U}_K &= e^{-\gamma_u l} \underline{A} + e^{\gamma_u l} \underline{B}.\end{aligned}\quad (10)$$

где  $l$  – длина линии, а индексы  $n$  и  $k$  обозначают ее начало и конец.

Решение данной системы при использовании блочной формы записи матриц имеет следующий вид

$$\begin{bmatrix} \underline{A} \\ \underline{B} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{E} \\ e^{-\gamma_u l} & e^{\gamma_u l} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{U}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_H \\ \underline{U}_K \end{bmatrix}, \quad (11)$$

где  $\underline{U}_H = \begin{bmatrix} \underline{U}_{a.H} \\ \underline{U}_{b.H} \\ \underline{U}_{c.H} \end{bmatrix}$ ;  $\underline{U}_K = \begin{bmatrix} \underline{U}_{a.K} \\ \underline{U}_{b.K} \\ \underline{U}_{c.K} \end{bmatrix}$  – фазные напряжения начала и конца линии

Откуда

$$\begin{aligned}\underline{A} &= H_{11} \underline{U}_H + H_{12} \underline{U}_K; \\ \underline{B} &= H_{21} \underline{U}_H + H_{22} \underline{U}_K.\end{aligned}\quad (12)$$

2. Определяются векторы - столбцы  $\underline{C}$ ,  $\underline{D}$  путем решения системы матричных уравнений, записываемой на основе второго уравнения системы (6) для  $x$  соответствующего началу и концу линии:

$$\begin{aligned}\underline{I}_H &= \underline{C} + \underline{D}; \\ \underline{I}_K &= e^{-\gamma_i l} \underline{C} + e^{\gamma_i l} \underline{D}.\end{aligned}\quad (13)$$

Решение данной системы при использовании блочной формы записи матриц имеет следующий вид

$$\begin{bmatrix} \underline{C} \\ \underline{D} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{E} \\ e^{-\gamma_i l} & e^{\gamma_i l} \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_H \\ \underline{I}_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{21} & W_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{I}_H \\ \underline{I}_K \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где  $\underline{I}_H = \begin{bmatrix} \underline{I}_{a.H} \\ \underline{I}_{b.H} \\ \underline{I}_{c.H} \end{bmatrix}$ ;  $\underline{I}_K = \begin{bmatrix} \underline{I}_{a.K} \\ \underline{I}_{b.K} \\ \underline{I}_{c.K} \end{bmatrix}$  – фазные токи начала и конца линии

Откуда,

$$\begin{aligned}\underline{C} &= W_{11} \cdot \underline{I}_H + W_{12} \cdot \underline{I}_K; \\ \underline{D} &= W_{21} \cdot \underline{I}_H + W_{22} \cdot \underline{I}_K.\end{aligned}\quad (15)$$

3. Определяются векторы - столбцы напряжений и токов в начале и в конце линии с использованием уравнений системы (8, 9) с учетом определенных значений векторов-постоянных интегрирования

$$\begin{aligned}\underline{Y} \cdot \underline{U}_H - \gamma_i \cdot (W_{11} \cdot \underline{I}_H + W_{12} \cdot \underline{I}_K) + \gamma_i \cdot (W_{21} \cdot \underline{I}_H + W_{22} \cdot \underline{I}_K) &= 0; \\ \underline{Y} \cdot \underline{U}_K - \gamma_i e^{-\gamma_i l} \cdot (W_{11} \cdot \underline{I}_H + W_{12} \cdot \underline{I}_K) + \gamma_i e^{\gamma_i l} \cdot (W_{21} \cdot \underline{I}_H + W_{22} \cdot \underline{I}_K) &= 0; \\ \underline{Z} \cdot \underline{I}_H - \gamma_u \cdot (H_{11} \cdot \underline{U}_H + H_{12} \cdot \underline{U}_K) + \gamma_u \cdot (H_{21} \cdot \underline{U}_H + H_{22} \cdot \underline{U}_K) &= 0; \\ \underline{Z} \cdot \underline{I}_K - \gamma_u e^{-\gamma_u l} \cdot (H_{11} \cdot \underline{U}_H + H_{12} \cdot \underline{U}_K) + \gamma_u e^{\gamma_u l} \cdot (H_{21} \cdot \underline{U}_H + H_{22} \cdot \underline{U}_K) &= 0.\end{aligned}\quad (16)$$

Полученные матричные уравнения, попарно объединенные в системы, образуют математические модели режимов и обеспечивают расчеты в разных постановках расчетных задач. В тех случаях, когда токи нагрузок заранее неизвестны и определяются в процессе расчета в зависимости от узловых напряжений с использованием соответствующих математических моделей, расчет должен выполняться итерационно

$$\begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{12} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \end{bmatrix}^{k+1} = \begin{bmatrix} \underline{J}_1(u_1^k) \\ \underline{J}_2(u_2^k) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{Y}_{1\delta} \\ \underline{Y}_{2\delta} \end{bmatrix} \times \underline{U}_\delta. \quad (17)$$

Для расчета несимметричных режимов различие нагрузок в трех фазах получены в зависимости от неравенства нагрузок на фидерных зонах тяговой системы электроснабжения с помощью моделирования трехфазного трансформатора и трансформатора Скотта в ПВК Matlab.

Для моделирования трансформатора Скотта использован блок Multi-Winding Transformer из библиотеки блоков SymPowerSystems. С помощью разработанной модели получены осциллограммы напряжений на первичной и вторичной сторонах трансформатора Скотта при равенстве нагрузок в двух фазах (Рисунок 9).

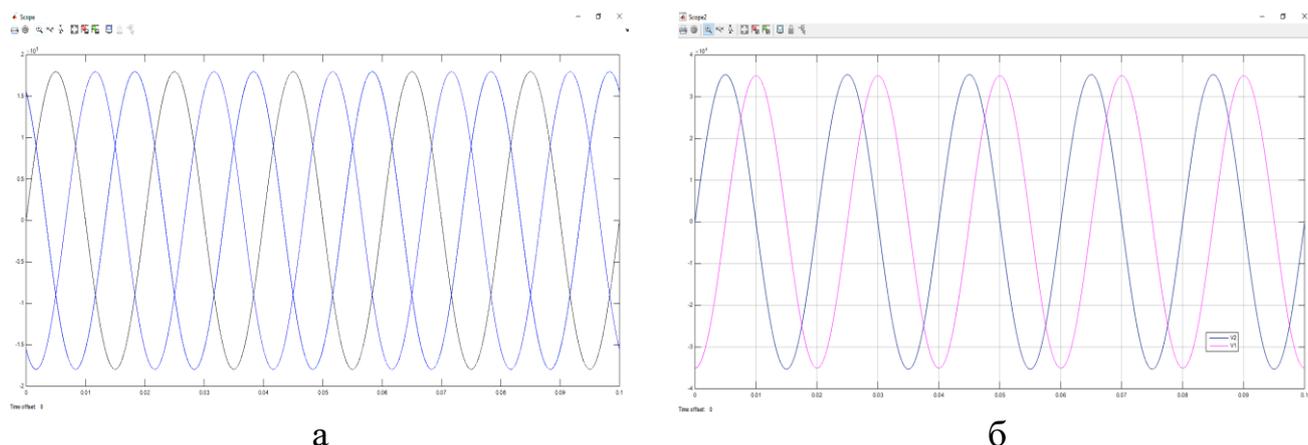


Рисунок 9 – Осциллограмма напряжений на первичной и вторичной сторонах трансформатора Скотта при равенстве нагрузок в двух фазах на вторичной стороне

В качестве возмущающего воздействия изменялась нагрузка в плечах двух фаз со стороны напряжением 25 кВ последовательно на 10%, 20%, 30%, а также 0%, то есть при равномерной нагрузке.

С учетом определенных значений векторов постоянного интегрирования определяются вектор-столбцы напряжений и токов в начале и в конце линии, а также на каждом сечении, на сколько частей разобьем линию. После определения выше изложенных параметров для каждой линии составляется алгоритм для расчета несимметричного режима, показанный на Рисунке 10.

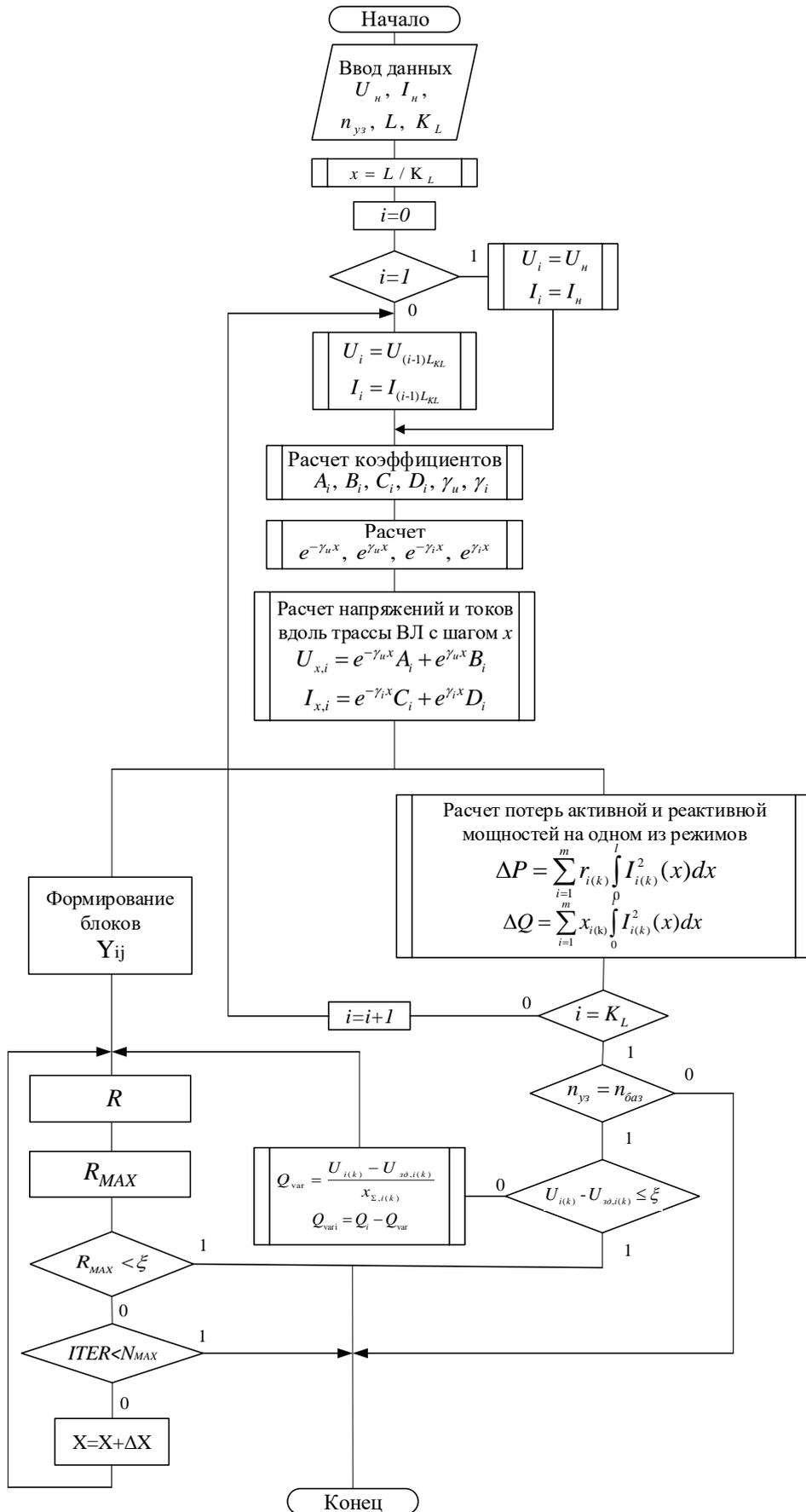


Рисунок 10 – Базовый алгоритм расчета потерь мощности в ВЛ с учетом распределенности параметров

На основании приведенной модели выполнены исследования режимов электрической сети по второму сценарию; полученные результаты показаны на Рисунке 11.

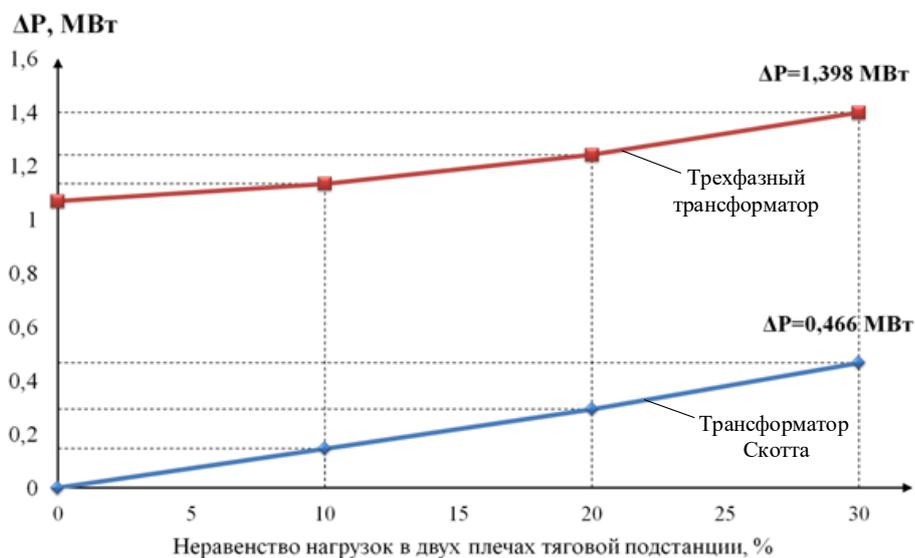


Рисунок 11 –Дополнительные потери активной мощности от несимметрии напряжения в трехфазной сети

**В пятой главе** выполнен расчет экономического эффекта использования трансформатора Скотта по сравнению с трехфазным трансформатором на основе полученных результатов в главе 4 по методу чистого дисконтированного дохода. Используются стоимости трансформаторов, взятые от ООО “Новосибирский Трансформаторный Завод – НТЗ” и компании “ABB” в мае 2018 года. Для инвестиционного проекта первоначальные затраты составляют, разница суммарных первоначальных капиталовложений, 57 848 000 рублей. В данном случае для инвестиционного проекта - это первоначальные затраты, так как проект только начинающийся, другие факторы задачи считаем равноценными. Таким образом, экономический расчет проведем, опираясь на разницу стоимостей этих трансформаторов. В Таблице 6 приведены исходные данные для экономического расчета.

Таблица 6 – Исходные значения для расчетов

| $\Delta P_{3\text{ ф.тр.}}$ , кВт | $\Delta P_{\text{Скотт}}$ , кВт | $\Delta P_{\text{Э}}$ , кВт | $C_p$ , руб/кВт.ч | $\tau$ , ч (при $T_{\text{max}}=6000\text{ч}$ ) | $Z_{\text{Э}}$ , руб. |
|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------|---|-----------------------|
| 1398                              | 466                             | 932                         | 4                 | 4592  | 17 118 976            |

В соответствии с ГОСТ 11677-85 срок эксплуатации силовых трансформаторов составляет 25 лет.

Ставка дисконтирования принята равной 21,6% (Центральный банк, Монголия). Рассчитанные показатели, учитывающие факторы времени, приведены в Таблице 7.

Таблица 7 – ЧДД, ИДД, ВНД, СО

|   |      |               |
|---|------|---------------|
| Чистый дисконтированный доход             | NPV2 | 20 809 916 р. |
| Индекс дисконтированной доходности        | PI2  | 1,36          |
| Внутренняя норма доходности               | IRR2 | 26 %          |
| Срок окупаемости с учетом дисконтирования | DPP2 | 7 лет         |

График зависимости денежного потока от периода показан на Рисунке 12.

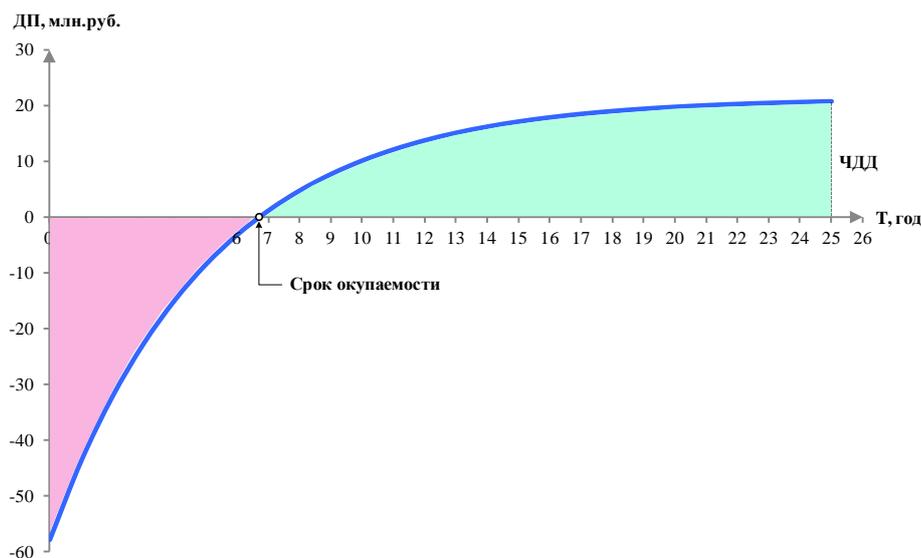


Рисунок 12 – Графическая интерпретация срока окупаемости дополнительного капиталовложения

Таким образом, трансформатор Скотта имеет экономические преимущества по отношению к трехфазному трансформатору. Поэтому он рекомендуется для новых проектов. Срок окупаемости для данного фрагмента ЭЭС составил около 7 лет, что вполне допустимо, так как для железных дорог допустимый срок окупаемости составляет 10 лет.

**В заключении** сформулированы основные результаты работы.

**В приложении** к диссертации содержатся результаты исследования и материалы, подтверждающие внедрение данной работы.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлены граничные условия перехода от тепловозной на электрическую тягу переменного тока 2х25 кВ, и определена дополнительно необходимая установленная активная мощность в электроэнергетической системе Монголии для обеспечения растущего объема грузоперевозок. Показано, что главный путь устойчивого развития электроэнергетической системы и инфраструктуры железнодорожного транспорта состоит в масштабной реконструкции электросетевого комплекса для улучшения транспортных связей между государствами Европы и Азии.

2. Выведены уравнения для соотношения напряжений и определения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной последовательности практически для всех важных способов трансформаторного присоединения систем тягового электроснабжения с числом фаз, не кратным трем. Дана оценка симметрирующей способности каждого вида трансформаторного присоединения и приведен их сравнительный анализ. При этом наибольшее внимание уделено трансформаторам Скотта и Ле Бланка, которые обеспечивают наилучшее симметрирование режимов. Доказано, что выравнивание токов в плечах трансформаторов Скотта и Ле Бланка на стороне низкого напряжения (25 кВ) от 0 до 30% обеспечивает симметрирование режима в трехфазной питающей сети в пределах нормируемых значений.

3. Предложенная математическая модель для расчета коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности адекватно определяет индивидуальные вклады несимметрии от каждого элемента электрической сети. Разработана имитационная модель несимметричного режима, учитывающая вносимую долю несимметрии нагрузки, источника питания и линии электропередачи, реализованная в Matlab. С помощью данной модели выполнена верификация аналитической модели.

4. Рассмотрены два возможных сценария присоединения опорных тяговых подстанции северной части железнодорожной магистрали АО УБЖД через трансформатор Скотта: к сети напряжением 110 кВ или к сети 220 кВ. При этом расчеты режимов для обоих сценариев показали необходимость компенсации реактивной мощности в узлах с пониженными напряжениями. Поиск оптимального решения осуществлялся градиентным методом и методом роевого интеллекта. Лучший результат показал алгоритм роя частиц роевого интеллекта, который позволил найти глобальный минимум потерь активной мощности в электрической сети.

5. Предложен метод расчета несимметричных режимов сложнзамкнутой электрической сети с несимметричной нагрузкой. В методе учтены геометрия расположения проводов и распределенность параметров линии, что позволяет учитывать дополнительные потери от несимметрии.

6. Установлена зависимость между коэффициентом несимметрии по обратной последовательности и величиной дополнительных потерь активной мощности в электрической сети ЭЭС для двух принципиально важных случаев присоединения тяговых нагрузок через трехфазный трансформатор и трансформатор Скотта. Показано, что при трехфазном трансформаторе в точке присоединения четырех тяговых подстанций рост дополнительных потерь от несимметрии в трехфазной сети составляет 1,398 МВт, то есть 6,77%. При тех же условиях режима, но при присоединении через трансформатор Скотта, дополнительные потери составляют 0,466 МВт, то есть увеличиваются на 2,25%.

7. Присоединение тяговых нагрузок приводит к дефициту реактивной мощности в ЭЭС Монголии, что требует оптимизации размещения дополнительных компенсирующих устройств и выбора их оптимальной мощности. Оптимизация режимов ЭЭС по реактивной мощности показывает, что по первому сценарию присоединения системы тягового электроснабжения к сети

110 кВ Монгольской ЭЭС суммарные потери активной мощности могут быть существенно снижены от 48,42 МВт до 45,82 МВт при использовании градиентного метода, а по методу роевого интеллекта до 45,64 МВт.

Аналогичная картина наблюдается и при втором сценарии, при присоединении тяговых нагрузок к сети 220 кВ. Градиентный метод показал снижение потерь до 36,65 МВт, а метод роя частиц 36,29 МВт, с размещением компенсирующих устройств в трех узлах вместо предложенных восьми. Сокращение числа узлов для возможной установки КУ негативно влияет на поиск экстремума для градиентного метода, и не влияет на поиск экстремума методом роевого интеллекта, так как сокращение числа узлов эквивалентно уменьшению числа «степеней свободы».

8. Выполненное моделирование трансформатора Скотта и трехфазного трансформатора при неравенствах нагрузок двух плеч на 0%, 10%, 20%, 30% показало, что трансформатор Скотта обладает значительно лучшей симметрирующей способностью. Так, например, снижает коэффициент несимметрии с  $k_{2U}=2,68\%$  до  $k_{2U}=1,64\%$  при 30% неравенстве токов в плечах по сравнению с трехфазным трансформатором, то есть снижает несимметрию на 38,8%. Следует также отметить, что при равенстве токов в плечах трансформатор Скотта дает полную симметрию на высокой стороне  $k_{2U}=0\%$ , в то время как трехфазный трансформатор уже дает  $k_{2U}=2,35\%$ . В целом, несимметрия от трехфазного трансформатора имеет более пологий характер по сравнению с трансформатором Скотта.

9. Экономические расчеты позволяют утверждать, что трансформаторное присоединение тяговой системы электроснабжения к ЭЭС целесообразно выполнять с помощью трансформаторов Скотта, обладающими значительно лучшими симметрирующими способностями по сравнению с трехфазными трансформаторами. Срок окупаемости трансформаторов Скотта, с учетом инвестиционных рисков и инфляционных ожиданий, составляет около 7 лет.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Бумцэнд, У. Электрификация международного транспортного железнодорожного коридора «Азия - Европа» как путь устойчивого развития электроэнергетической системы Монголии / В. З. Манусов, Б. В. Палагушкин, У. Бумцэнд // Известия Транссиба. – 2016. – № 4 (28). – С. 94–101.

2. Бумцэнд, У. Сравнительный анализ ступеней трансформации в распределительных электрических сетях Российской Федерации и Европейского Союза / В. З. Манусов, У. Бумцэнд, В. В. Фролова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2017. – № 1-2. – С. 177–180.

3. Бумцэнд, У. Анализ и оптимизация режимов электроэнергетической системы Монголии с учетом электрификации Уланбаторской железнодорожной магистрали / В. З. Манусов, У. Бумцэнд, Э. Энхсайхан // Новое в российской электроэнергетике. – 2017. – № 10. – С. 55–66.

4. **Бумцэнд, У.** Оптимальные режимы Монгольской энергосистемы при электрификации железнодорожного коридора Азия-Европа / В. З. Манусов, У. Бумцэнд // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – № 1. – С. 170–174.

*Публикации в зарубежных изданиях:*

5. **Bumtsend, U.** Optimization compensating devices in the power supply systems using population algorithms / V. Z. Manusov, U. Bumtsend, E. S. Tretyakova // Proceedings of IFOST-2016 11th International Forum on Strategic Technology, June 1–June 3, 2016. – Novosibirsk : NSTU. – P. 276–279.

*Материалы международных и всероссийских конференций:*

6. **Бумцэнд, У.** Эффективность электрификации акционерного общества «Улан-Баторская железная дорога» / У. Бумцэнд, В. З. Манусов // Наука. Технологии. Инновации : сб. науч. тр. В 9 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2016. – С. 3–5.

7. **Бумцэнд, У.** Симметрирование режимов в питающих электрических сетях электроэнергетической системы с тяговой системой электроснабжения / У. Бумцэнд, В. З. Манусов // Молодежь. Наука. Технологии : сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф. студентов и молодых ученых. В 4 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2017. – Ч. 4. – С. 15–17.