

На правах рукописи

Королев Алексей Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПО СИММЕТРИРОВАНИЮ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МГУПС МИИТ) на кафедре «Энергоснабжение электрических железных дорог»

Научный руководитель: Бадёр Михаил Петрович
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Ермоленко Дмитрий Владимирович
доктор технических наук, профессор,
Открытое акционерное общество
«Научно-Исследовательский Институт
Железнодорожного Транспорта» (ОАО «ВНИИЖТ»),
отделение Электрификации и энергоснабжения железных
дорог, лаборатория тяговых подстанций,
главный научный сотрудник

Дудин Борис Алексеевич
кандидат технических наук, доцент
(МГУПС МИИТ), кафедра «Электротехника,
метрология и электроэнергетика», доцент

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВПО РГУПС)

Защита состоится «18» декабря 2013 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.02, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» по адресу: 127994, Москва, ул. Образцова, д.9, стр. 9., аудитория 4210

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке (МГУПС МИИТ).

Автореферат разослан « ____ » ноября 2013 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Сидорова Наталья Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящий момент проблема выбора наиболее оптимальной схемы питания тяговой сети переменного тока не является решённой в полном объёме. С точки зрения энергосистемы ЭПС системы 25 кВ переменного тока представляет собой однофазную нагрузку большой мощности.

При распределении однофазной нагрузки по фазам трёхфазной сети возникает несимметрия токов, вследствие которой возникает несимметрия напряжений. Основная задача, решаемая при проектировании схемы питания тяговой сети – выравнивание нагрузки фаз энергосистемы (питающей сети). Распределение мощности по фазам питающей сети определяет падения напряжения в различных узлах системы. При несимметричной нагрузке (несимметрии токов) падения напряжений становятся несимметричными, что вызывает несимметрию напряжений.

Оценка степени несимметрии напряжений осуществляется с помощью разложения трехфазной системы напряжений по методу симметричных составляющих и определении коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности в виде отношения напряжения обратной последовательности к напряжению прямой последовательности. Допустимые значения этого коэффициента регламентируются в соответствии с стандартом ГОСТ Р 54149-2010 (начало действия – 1 января 2013 г; введён взамен стандарта ГОСТ 1309-97). Превышение допустимых показателей несимметрии напряжения приводит к отрицательным последствиям для всей энергетической системы, начиная от повышенных потерь энергии и заканчивая снижением срока службы трёхфазных электродвигателей и других электропотребителей, получающих питание от сетей общего назначения. Другой проблемой является потребление тяговой сетью реактивной мощности, обусловленной:

- реактивными сопротивлениями внешней сети;
- реактивными сопротивлениями тяговой сети;
- явлениями, происходящими в ЭПС.

Различные схемы питания тяговых сетей переменного тока различным образом распределяют токи тяговой сети по фазам питающей сети, создавая различную степень несимметрии по обратной последовательности. С этой точки зрения, наилучшими характеристиками обладают схемы, построенные на основе идеи Скотта о питании тяговых плеч напряжениями, угол между которыми составляет $\pi/2$. Однако, даже схемы, построенные на идее Скотта, обеспечивают 100%-ю симметрию токов только при равенстве токов плеч питания. При этом не решается проблема потребления реактивной мощности.

Для полного снижения несимметрии токов и снижения потребления реактивной мощности (повышения коэффициента мощности) применяются установки поперечной компенсации реактивной энергии (КУ ППК).

Для различных схем требуется различная суммарная мощность установок КУ ППК, обеспечивающая 100%-ю симметрию и 100%-ю компенсацию. Чем более симметричную загрузку фаз питающей сети обеспечивает схема питания, тем меньшая суммарная мощность установок компенсации ей требуется для доведения симметрии загрузки фаз до 100%-й и для компенсации реактивной мощности.

Учитывая, что загрузка плеч питания тяговых подстанций является неравномерной и изменяется в широких пределах за короткие интервалы времени, поддерживать допустимый уровень симметрии токов и коэффициента мощности становится затруднительно. Исследование, проведённое в работе, позволило разработать схему питания тяговой сети переменного тока, позволяющую:

- Уменьшить требования к числу переключений для регулирования мощности КУ ППК;
- Уменьшить диапазон регулирования мощности КУ ППК;
- Создать конфигурацию тяговой сети, в которой отсутствует чередование фаз напряжений и, как следствие, нейтральные вставки в контактной сети, повреждения в которых являются причиной возникновения двухфазных коротких замыканий при использовании существующих схем питания.

В качестве **объекта исследования** рассматривается система тягового электроснабжения переменного тока.

Предметом исследования является новый подход к построению схем питания тяговых сетей переменного тока, а также процессы, протекающие в устройствах, образующих эти схемы.

Степень разработанности проблемы. Исследованию проблемы построения эффективной системы тягового электроснабжения, включающей в себя схемы питания различных типов, посвящены работы следующих учёных: Косарева Б.И., Косарева А.Б., Мамошина Р.Р., Караева Р.И., Конга А.А., Котельникова А.В., Марквардта К.Г., Марквардта Г.Г., Неймана Л.Р., Овласюка В.Я., Пупынина В.Н., Ратнера М.П., Бычкова А.Н., Розенфельда В.Е., Мясникова Л.В., Бадёра М.П., Буркова А.Т., Жаркова Ю.И., Фигурнова Е.П., Бочева А.С., Германа Л.А., Хлопкова А.М., Ермоленко Д.В., Демченко А.Т., Кучумова В.А., Широченко Н.Н., Мамонова Д.И., Добровольскиса Т.П., Дарчиева С.Х., Дынькина Б.Е., Кравчука В.В., Кувшинова Г.Е., Барбачкова А.С. и др., а также зарубежных авторов (Charles F. Skott, Thomas J. Blalock, Le Blanc и др.).

Обоснование целесообразности совершенствования системы тягового электро-снабжения переменного тока представлено в научных трудах Марквардта К.Г., Мамошина Р.Р., Косарева Б.И., Пупынина В.Н.

Цель работы – разработка новой схемы питания тяговой сети переменного тока промышленной частоты и методов для её математического моделирования.

Для её достижения в работе были поставлены следующие задачи:

- Анализ существующих вариантов схем питания тяговых сетей переменного тока промышленной частоты;
- Построение схем питания тяговых сетей переменного тока промышленной частоты без чередования фаз в тяговой сети;
- Оценка степени компенсации реактивной энергии, которая необходима для поддержки 100%-й симметрии и 100%-й компенсации на стороне энергосистемы при использовании новой схемы питания;
- Сравнение новой схемы питания с наиболее распространённой на территории Российской Федерации схемой питания У/Д-11;
- Разработка магнитной системы симметрирующего трансформатора, являющегося основой новой схемы питания;
- Разработка математической модели для моделирования работы нового трансформатора на основе методов теории электрических цепей и электромагнитного поля;

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Предложен новый подход к построению схем питания тяговых сетей переменного тока промышленной частоты;
- Предложена реализация нового типа схем питания;
- Доказана эффективность новой схемы питания с точки зрения повышения качества электрической энергии в энергетической сети, питающей тяговую подстанцию с новой схемой питания;
- При использовании новой схемы питания упрощается конструкция и эксплуатация контактной сети за счёт ликвидации нейтральных вставок, необходимых для чередования фаз напряжений различных участков контактной сети;
- Построена математическая модель для компьютерного моделирования системы электроснабжения с учётом нового трансформатора, являющегося основой предложенной в работе схемы питания.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- Описанная в работе новая схема питания существенно снижает несимметрию напряжений и потребление реактивной мощности в питающей энергосистеме;
- Применение предлагаемой в работе схемы питания упрощает конструкцию контактной сети за счёт ликвидации нейтральных вставок, что упрощает эксплуатацию контактной сети и ликвидирует возможность возникновения двухфазных коротких замыканий при повреждениях нейтральных вставок или их ошибочном замыкании;
- Предложенная схема питания может использоваться как в системе тягового электроснабжения 25 кВ, так и в системе 2х25 кВ;
- Разработанная математическая модель симметрирующего трансформатора нового типа позволяет выполнять расчёты в целях проектирования устройств для создания новых схем питания тяговых сетей, так и для исследования в области широкого класса электромагнитных устройств.

Методологические основы и методы исследований. Для достижения поставленных целей используются методы по анализу качества электрической энергии в электрической сети, питающей тяговую сеть системы 25 кВ переменного тока промышленной частоты, и по построению математической модели трансформатора, лежащего в основе разрабатываемой схемы питания.

Анализ качества электрической энергии осуществляется с точки зрения оценки несимметрии токов и напряжений по обратной последовательности методом симметричных составляющих.

Для построения математической модели трансформатора, лежащего в основе новой схемы питания, применены методы теории электрических цепей, электрических машин, электромагнитного поля и вычислительной математики. Для построения модели электрической цепи предлагаемого трансформатора применяется подход, основанный на модели обобщённой электрической машины, описывающей процессы, протекающие в электрической цепи трансформатора, с помощью системы дифференциальных уравнений относительно токов и напряжений обмоток трансформатора в наиболее общей форме. Для определения индуктивностей обмоток трансформатора применён основанный на методе конечных элементов метод Галёркина по решению задачи численного расчёта переменного электромагнитного поля в пространственном случае для неоднородной среды с учётом нелинейности характеристики намагничивания электротехнической стали и влияния вихревых токов. Для построения конечно-элементной сетки, разбивающей область расчёта электромагнитного поля трансформатора, применён метод «Продвижение фронта».

На защиту выносятся следующие положения:

- Новый подход к построению схем питания тяговых сетей переменного тока;

- Схема питания, реализующая новый подход к построению схем питания тяговых сетей переменного тока на основе специального симметрирующего трансформатора в совокупности с установками компенсации реактивной мощности;
- Методика моделирования электромагнитных процессов, протекающих в предлагаемом в работе симметрирующем трансформаторе.

Достоверность результатов исследований обеспечивается:

- Сопоставлением предлагаемой схемы питания с существующими схемами питания, основанными на аналогичных электротехнических принципах.
- Применением фундаментальных законов теории электрических цепей, электрических машин и электромагнитного поля.
- Корректностью принятых допущений и строгостью формальных преобразований
- Применением апробированных в различных областях науки и техники методов моделирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и её результаты докладывались и обсуждались на заседаниях кафедры, конференциях «Неделя науки», «Безопасность движения», 53-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», шестом международном симпозиуме «Электрификация и развитие инфраструктуры энергообеспечения тяги поездов на железнодорожном транспорте» (Элтранс 2011).

Публикация основных положений диссертационной работы произведена в журналах: «Мир транспорта» - №1 (34), 2011 г.; «Электротехника и электрооборудование транспорта» - № 2-3., 2012 г.

Основные положения работы по разработке новой схемы питания тяговых сетей переменного тока промышленной частоты отмечены медалью министерства образования и науки Российской Федерации «За лучшую научную студенческую работу» (приказ Федерального агентства по образованию от 15 июля 2009 г. №641).

Результаты работы внедрены в практику компании ЗАО «ЕТАР СИСТЕМС», что подтверждается Актом внедрения № ЕС-01-2013 от 28.10.2013.

Публикации. По тематике диссертации опубликовано 7 работ, 3 из которых – в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объём и содержание работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и приложения. Диссертация содержит 153 страницы машинописного текста, в том числе 54 рисунка, 9 таблиц, список литературы из 73 наименований и 1 приложение.

Содержание работы

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертации, формулировке целей работы и задач исследования. Обосновано наличие проблемы качества электрической энергии, показатели которого регламентируются стандартом ГОСТ Р 54149-2010 (начало действия – январь 2013 г.), в сетях, питающих тяговые подстанции переменного тока, и необходимость дальнейшего совершенствования схем питания тяговых сетей переменного тока.

Первая глава содержит обзор существующих схем питания тяговых сетей переменного тока промышленной частоты. Приведено сопоставление различных типов схем питания тяговых сетей переменного тока:

- Схема питания на основе однофазных трансформаторов (рисунок 1);

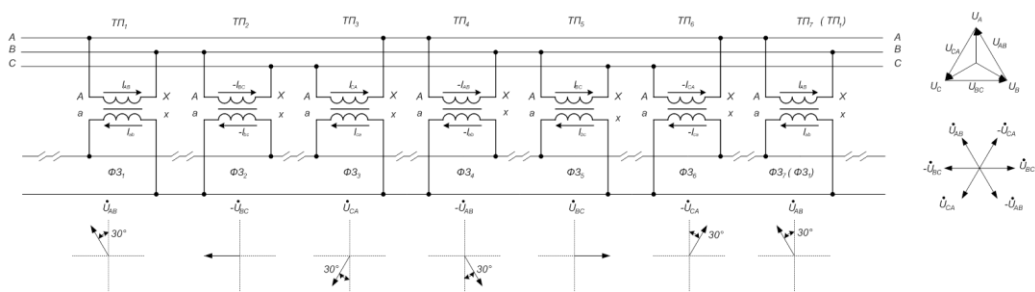


Рисунок 1 - Схема питания на основе однофазных трансформаторов. Чередование фаз

- Схема «Открытый треугольник» (рисунок 2);

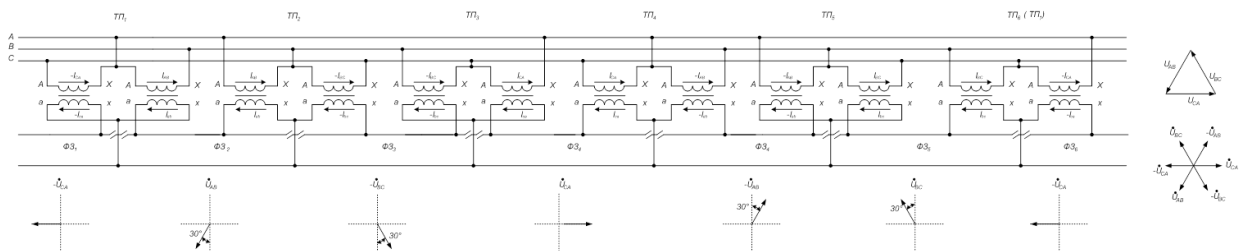


Рисунок 2 - Схема питания «Открытый треугольник». Чередование фаз

- Схема питания на основе трёхфазного трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Δ-11 (рисунок 3);

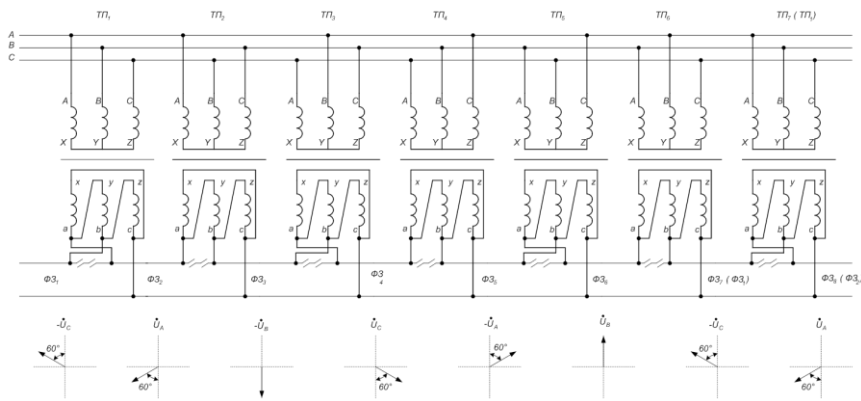


Рисунок 3 - Схема Y/Δ-11. Чередование фаз

- Трёхфазно-двухфазная схема Скотта (рисунок 4);

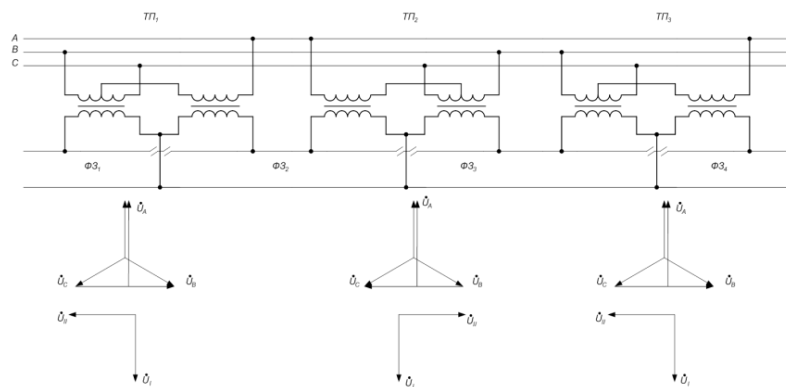


Рисунок 4 - Схема Скотта. Чередование фаз

- Система 94/27,5 кВ для участков большой протяжённости (рисунок 5)

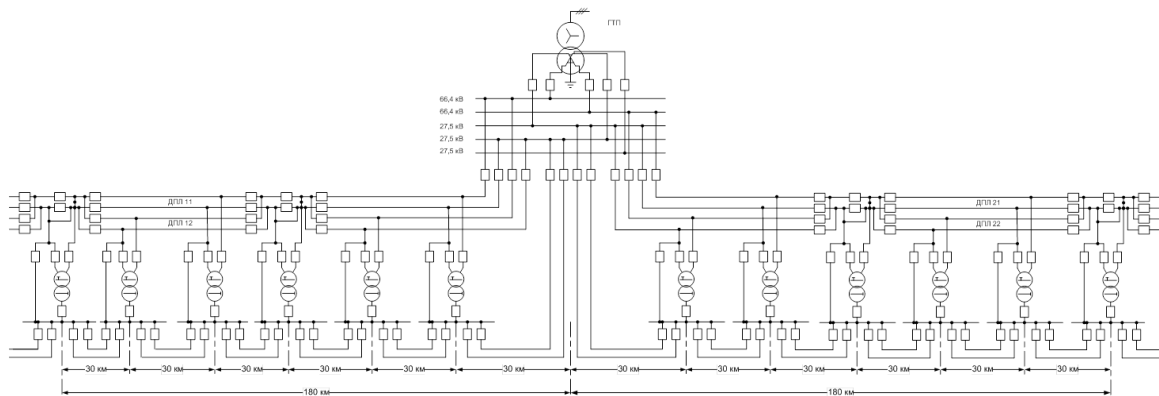


Рисунок 5 - Система 94/27,5 кВ (2 плеча одной ГТП)

Наиболее распространённой на территории Российской Федерации является схема Y/Δ-11. Схемы, построенные на идее Скотта обладают более высокими характеристиками с точки зрения симметрирования мощности нагрузки тяговой сети по фазам питающей трёхфазной сети, чем Y/Δ-11 (рисунок 6).

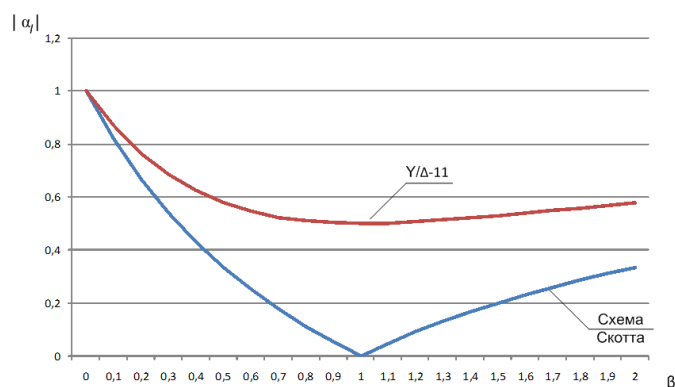


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности α для схемы Скотта и Y/Δ-11 в зависимости от отношения токов плеч питания β

При равной нагрузке плеч питания схема Скотта обеспечивает 100%-ю симметрию токов на стороне трёхфазной сети. На этой идее построена, в частности, система 94/27,5 кВ, обеспечивающая высокую симметрию трёхфазной мощности при использовании на участках большой протяжённости. Однако, для дальнейшего повышения качества симметрии напряжений в сети нужны дальнейшие исследования в области схем питания тяговых сетей переменного тока.

Во второй главе описывается новый принцип построения схем питания тяговой сети переменного тока промышленной частоты. В рамках предлагаемой идеи приведены различные варианты реализации новой схемы питания («Симметрирующий фазопреобразователь»), обеспечивающей повышенные показатели симметрии загрузки фаз питающей энергосистемы. Из предложенных вариантов выбран оптимальный. Определена степень компенсации реактивной энергии каждой обмотки симметрирующего фазопреобразователя, при которой его работа является эффективной.

Структурно, новая схема питания имеет вид (рисунок 7)

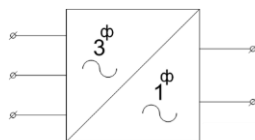


Рисунок 7 - Структурная схема новой схемы питания

Первый вариант реализации такого преобразователя с учётом установок поперечной компенсации реактивной энергии (КУ ППК) имеет вид (рисунок 8)

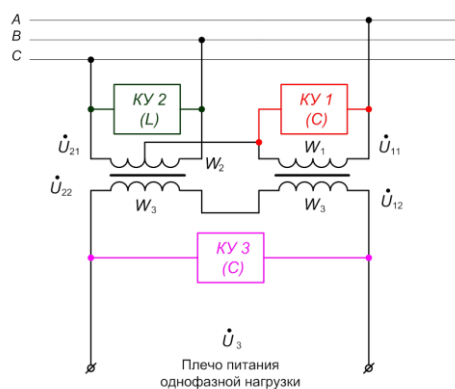


Рисунок 8 - Реализация новой схемы питания на основе двух трансформаторов

Принцип распределения мощности показан на векторной диаграмме (рисунок 9)

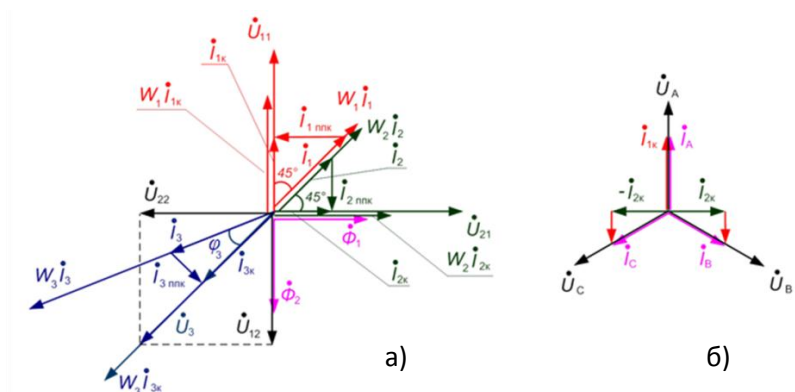


Рисунок 9 - Векторные диаграммы а) и б), поясняющие принцип работы новой схемы питания

Также, для реализации предлагаемой схемы питания может быть использован и одно-трансформаторный преобразователь (рисунки 10, 11). Устройство получило название «Симметрирующий фазопреобразователь».

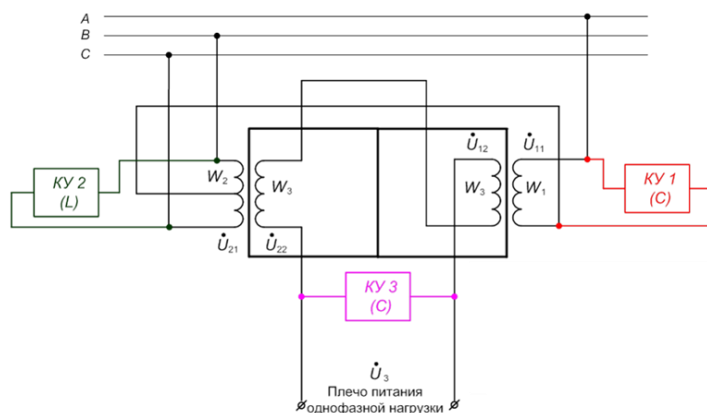


Рисунок 10 - «Симметрирующий фазопреобразователь» (однотрансформаторная реализация новой схемы питания)

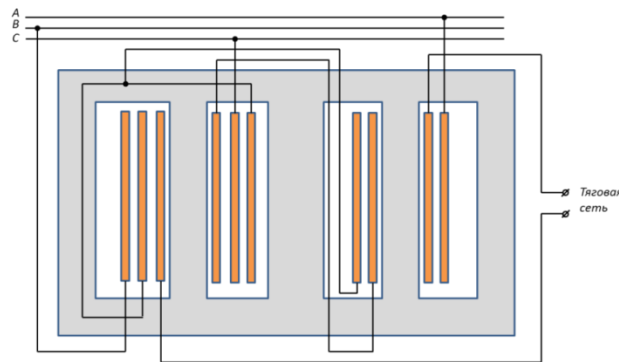


Рисунок 11 - Конструкция электромагнитной системы симметрирующего фазопреобразователя. Сечение среднего стержня больше сечений боковых стержней, базисная обмотка (включаемая на линейное напряжение) разделена на независимые катушки

При этом в среднем стержне величина магнитного потока в $\sqrt{2}$ раз больше потоков в боковых стержнях, что соответствующим образом увеличивает его сечение.

Показано, что оптимальным режимом работы устройства является режим полной или почти полной компенсации (выбор конкретных значений зависит от характеристик внешней сети в точках подключения подстанций с данным преобразователем) во всех обмотках (рисунок 12). Для этого рассмотрены режимы работы схемы при различных настройках регулирования устройств компенсации реактивной энергии (от 0 до 100% компенсации реактивной мощности с шагом 25%). Рассмотрены все 125 комбинаций положений устройств КУЗ, КУ1 и КУ2.

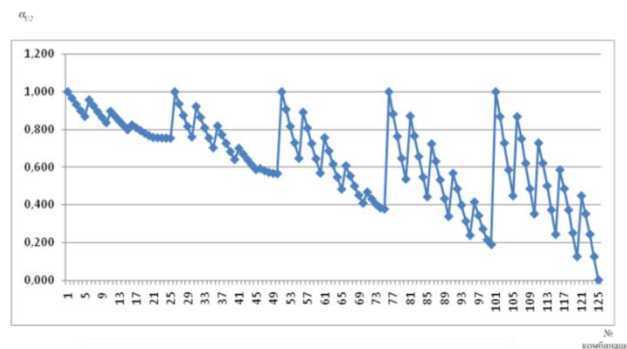


Рисунок 12 - Зависимость коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности от степени компенсации реактивной мощности обмоток

Схема питания должна иметь следующую систему управления, которая, исходя из поступающей информации о напряжении, токе и угле сдвига фаз между ними, должна отдавать команды по регулированию параметров установок поперечной компенсации для поддержания симметрии и компенсации на уровне 100%. Для этого при резком изменении нагрузки требуется быстрое регулирование параметров установок компенсации реактивной энергии. Наиболее эффективным способом изменения параметров этих устройств

является использование шунтирующих реакторов, регулируемых подмагничиванием постоянным током, разработанных в ФГУП ВЭИ. Устройства выпускаются серийно компанией ОАО «ЭЛУР».

Для регулирования ёмкостного эффекта конденсаторных батарей, включаемых в качестве установки поперечной ёмкостной компенсации, реактор описанного выше типа в однофазном исполнении комбинируется с батареей конденсаторов. Регулируя индуктивность реактора, можно добиваться изменения реактивного тока, протекающего по обмотке. Если требуется использование регулируемой индуктивной компенсации, то такой реактор используется в качестве основы установки поперечной индуктивной компенсации. Естественно, что применяемые установки ППК должны содержать фильтр-устройства для обеспечения отстройки от резонансных гармоник. Установки компенсации реактивной энергии на основе таких реакторов также выпускаются ОАО «ЭЛУР». Характеристики подобных реакторов и основанных на их использовании установок компенсации реактивной энергии позволяют обеспечивать достаточные скорость и диапазон регулирования мощности, чтобы поддерживать 100%-ю симметрию и компенсацию в трёхфазной сети.

Также в данной главе показаны преимущества использования новой схемы питания:

- Тяговая сеть получает питание от тяговых подстанций с одинаковым напряжением по амплитуде и по фазовому углу, что означает отсутствие явления чередования фаз в тяговой сети. Следствием этого является отсутствие необходимости установки нейтральных вставок в контактной сети, что облегчает процесс эксплуатации системы тягового электроснабжения и ликвидирует возможность возникновения двухфазных коротких замыканий из-за повреждений в нейтральных вставках.
- Снижение требований к числу переключений в КУ ППК и диапазона их переключений для поддержания 100%-й симметрии и 100%-й компенсации в питающей сети.

Ещё одним из преимуществ новой схемы питания является её применение для питания тяговых сетей малой протяжённости. В предельном случае такие участки могут состоять из одной межподстанционной зоны. Тяговые подстанции при этом устанавливаются на концах участка. На каждой из них загружено одно тяговое плечо. При этом, как схема Y/Δ -11, так и схема Скотта не могут симметризовать нагрузку без использования КУ ППК значительной мощности.

В результате для одной из подстанций были получены графики изменения суммарной мощности установок КУ ППК, поддерживающие режим 100%-й симметрии и компенсации для Y/Δ -11 (рисунок 13) и симметрирующего фазопреобразователя (рисунок 14).

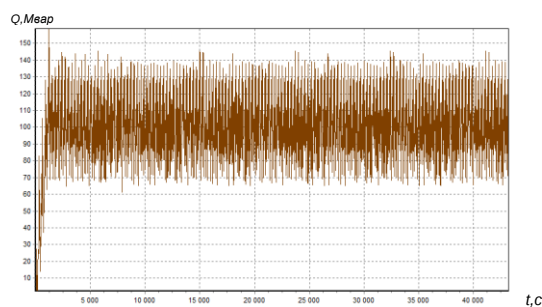


Рисунок 13 - Мощность КУ ППК для Y/Δ-11 в режиме 100%-й симметрии и компенсации

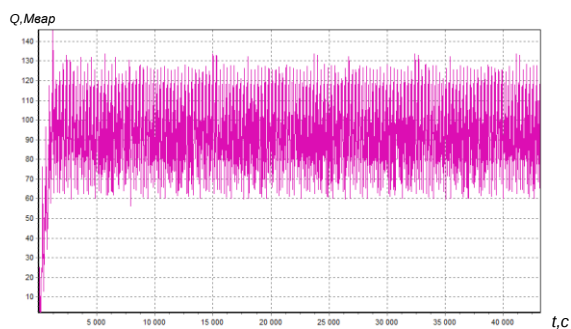


Рисунок 14 - Мощность КУ ППК для симметрирующего фазопреобразователя в режиме 100%-й симметрии и компенсации

По графику их разности (рисунок 15) видно, что новая схема питания требует примерно на 10% меньше мощности КУ ППК.

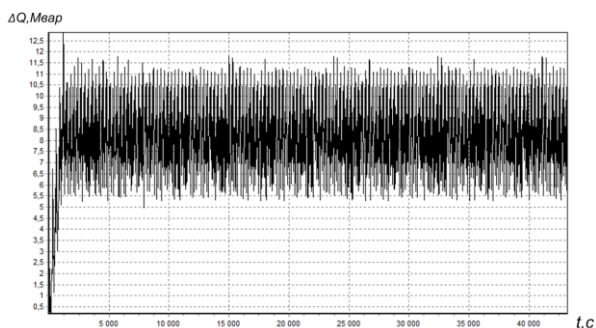


Рисунок 15 - Экономия мощности КУ ППК при использовании симметрирующего фазопреобразователя

Показана необходимость построения модели симметрирующего фазопреобразователя, чему посвящены главы 3 и 4.

В третьей главе описывается электромагнитная модель трансформатора с точки зрения электрических цепей его обмоток и с точки зрения электромагнитного поля. Приведены математические модели, на основе которых строится полная модель нового трансформатора, описываемая в главе 4.

Основой проектирования трансформатора является знание параметров его электромагнитного поля. По локальным параметрам (векторный магнитный потенциал, магнитная индукция и т.д.) определяются интегральные параметры (индуктивность и т.д.).

Для перехода от модели поля трансформатора к модели его цепей требуется расчёт индуктивностей его обмоток (собственных и взаимных, включая индуктивности рассеяния). Анализ цепей трансформатора производится с помощью системы дифференциальных уравнений трансформатора. Для однофазного трансформатора (рисунок 16) они имеют вид

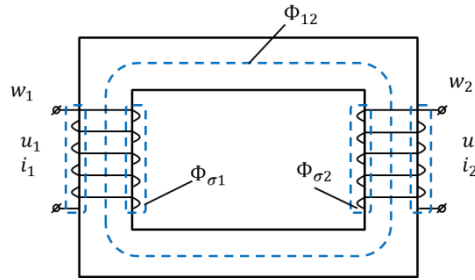


Рисунок 16 - Однофазный трансформатор

$$\begin{cases} u_1 = i_1 r_1 + \frac{d(L_{\sigma 1} i_1)}{dt} + \frac{d(M_{12}(i_1 + i_2))}{dt} \\ -u_2 = i_2 r_2 + \frac{d(L_{\sigma 2} i_2)}{dt} + \frac{d(M_{12}(i_1 + i_2))}{dt} \\ w_1 i_1 + w_2 i_2 = w_1 i_0 \end{cases}, \quad (1)$$

где u_1, u_2 — напряжения обмоток, i_1, i_2 — токи обмоток, r_1, r_2 — активные сопротивления обмоток, $L_{\sigma 1}, L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния обмоток, M_{12} — взаимная индукция между обмотками, w_1, w_2 — количества витков обмоток.

Без значений индуктивностей решение дифференциальных уравнений его обмоток невозможно. Для этого применяются методы теории электромагнитного поля, которое в общем виде описывается системой уравнений Максвелла и материальными уравнениями

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \mathbf{B} = \mu'(H) \mu_0 \mathbf{H} \\ \mathbf{D} = \varepsilon'(E) \varepsilon_0 \mathbf{E} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\mathbf{E}$ — напряжённость электрического поля, $\mathbf{B}$ — магнитная индукция, $\mathbf{H}$ — напряжённость магнитного поля, $\mathbf{J}$ — плотность тока, $\mathbf{D}$ — электрическое смещение, $\varepsilon'(E)$ — относительная диэлектрическая проницаемость среды, ε_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума, $\mu'(H)$ — относительная магнитная проницаемость среды, μ_0 — магнитная проницаемость вакуума.

Электромагнитное поле трансформатора можно свести к полю, источниками которого являются токи в обмотках и вихревые токи в деталях конструкции трансформатора

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \\ \mathbf{B} = \mu'(H)\mu_0 \mathbf{H} \end{cases} \quad (3)$$

Для произвольной конструкции электромагнитной системы трансформатора решение системы уравнений Максвелла может быть осуществлено только численными методами. В данной главе рассмотрено сопоставление различных численных методов расчёта электромагнитных полей. Для целей моделирования выбран метод конечных элементов (МКЭ) в сочетании с методом Галёркина. При этом задача сводится к решению уравнения (4) относительно векторного магнитного потенциала $\mathbf{A}$ (в уравнении не учитываются вихревые токи и гистерезис) на сетке из конечных элементов.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mu_0 \mathbf{J}, \quad (4)$$

где μ – абсолютная магнитная проницаемость среды

В общем пространственном случае произвольной магнитной системы трансформатора необходимо применять объёмные элементы. В данном случае в качестве элемента выбран четырёхузловой элемент первого порядка – тетраэдр.

В пределах каждого из них компоненты вектора $\mathbf{A}$ меняются линейно

$$\begin{cases} A_x(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 A_{ix} N_i(x, y, z) \\ A_y(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 A_{iy} N_i(x, y, z) \\ A_z(x, y, z) = \sum_{i=1}^4 A_{iz} N_i(x, y, z) \end{cases}, \quad (5)$$

где каждая функция формы $N_i(x, y, z)$ представляет собой линейную зависимость

$$N_i(x, y, z) = a_i + b_i x + c_i y + d_i z \quad (6)$$

И соответствует условию

$$N_i(x_j, y_j, z_j) = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases} \quad (7)$$

Итогом использования принципа Галёркина по обеспечению ортогональности невязки уравнения (4) по всей области решения является сведение уравнения (1) к решению СЛАУ

$$\mathbf{K}_c \mathbf{u}_c = \mathbf{r}_c \quad (8)$$

относительно компонент $\mathbf{A}$ в узлах сетки: Первоначальная запись СЛАУ имеет вид

$$\mathbf{K}_d^{(k)} \mathbf{u}_d^{(k)} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_{11}^{(k)} & \mathbf{K}_{12}^{(k)} & \mathbf{K}_{13}^{(k)} & \mathbf{K}_{14}^{(k)} \\ \mathbf{K}_{21}^{(k)} & \mathbf{K}_{22}^{(k)} & \mathbf{K}_{23}^{(k)} & \mathbf{K}_{24}^{(k)} \\ \mathbf{K}_{31}^{(k)} & \mathbf{K}_{32}^{(k)} & \mathbf{K}_{33}^{(k)} & \mathbf{K}_{34}^{(k)} \\ \mathbf{K}_{41}^{(k)} & \mathbf{K}_{42}^{(k)} & \mathbf{K}_{43}^{(k)} & \mathbf{K}_{44}^{(k)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{u}_1^{(k)} \\ \mathbf{u}_2^{(k)} \\ \mathbf{u}_3^{(k)} \\ \mathbf{u}_4^{(k)} \end{pmatrix} = \mathbf{r}_d^{(k)} = \begin{pmatrix} \mathbf{r}_1^{(k)} \\ \mathbf{r}_2^{(k)} \\ \mathbf{r}_3^{(k)} \\ \mathbf{r}_4^{(k)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

При этом,

$$\mathbf{K}_{ij}^{(k)} = v_k V_k \begin{pmatrix} d_i d_j + c_i c_j & -c_i b_j & -d_i b_j \\ -b_i c_j & d_i d_j + b_i b_j & -d_i c_j \\ -b_i d_j & -c_i d_j & c_i c_j + b_i b_j \end{pmatrix}, i, j = 1..4 \quad (10)$$

$$\mathbf{u}_i^{(k)} = \begin{pmatrix} A_{ix}^{(k)} \\ A_{iy}^{(k)} \\ A_{iz}^{(k)} \end{pmatrix}, i = 1..4 \quad (11)$$

$$\mathbf{r}_i^{(k)} = \begin{pmatrix} \frac{J_x^{(k)} D_k}{24} \\ \frac{J_y^{(k)} D_k}{24} \\ \frac{J_z^{(k)} D_k}{24} \end{pmatrix}, i = 1..4 \quad (12)$$

$$D_k = \begin{vmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{vmatrix} = 6V_k \quad (13)$$

После объединения повторяющихся узлов путём матричных преобразований

$$\mathbf{C}^T \mathbf{K}_d \mathbf{C} \mathbf{u}_c = \mathbf{C}^T \mathbf{r}_d, \quad (14)$$

где $\mathbf{C}$ – матрица перехода

получается СЛАУ (8).

В качестве метода её решения принят итерационный метод Bi-CGSTAB, обладающий наиболее быстрой и гладкой сходимостью из всех методов крыловского типа. Его особенностью является отсутствие требований к наличию симметричности и положительной определённости матрицы СЛАУ. Алгоритм метода имеет вид:

$$\begin{aligned}
l^0 &= r_c - K_c u_c^0, \quad p^0 = l^0, \forall l_*^0: (l_*^0, l^0) \neq 0 \\
&\text{for } n = 0, 1, \dots, \text{ while } (\|l^n\| \geq \varepsilon), \text{ do} \\
\alpha^n &= \frac{(l_*^0, l^n)}{(K_c p^n, l_*^0)}, s^n = l^n - \alpha^n K_c p^n \\
\omega^n &= \frac{(K_c s^n, s^0)}{(K_c s^n, K_c s^n)} \\
u_c^{n+1} &= u_c^n + \alpha^n p^n + \omega^n s^n \\
l^{n+1} &= s^n - \omega^n K_c s^n \\
\beta^n &= \frac{\alpha^n (l^{n+1}, l_*^0)}{\omega^n (l^n, l_*^0)} \\
p^{n+1} &= l^{n+1} + \beta^n (p^n - \omega^n K_c p^n)
\end{aligned} \tag{15}$$

Его использование позволяет эффективно получать решение СЛАУ с помощью как стандартных алгоритмов компьютерных программ, так и с помощью высокопроизводительных алгоритмов параллельных вычислений, реализующих возможности многоядерных систем и графических процессоров (GPU), к использованию которых для вычислений общего назначения относится программно-аппаратная технология CUDA от компании NVIDIA. Это позволяет получить в рамках персональной рабочей станции инженера-расчётчика высокоэффективное средство для проведения электромагнитных расчётов и последующего проектирования рассчитанного оборудования.

Данная модель является простейшей. При расчётах реальных трансформаторов необходимо учитывать гистерезис и вихревые токи в электромагнитной системе трансформатора. Достаточно эффективную модель электромагнитного поля трансформатора можно построить, если использовать кусочно-линейную аппроксимацию характеристики намагничивания электротехнической стали (рисунок 17).

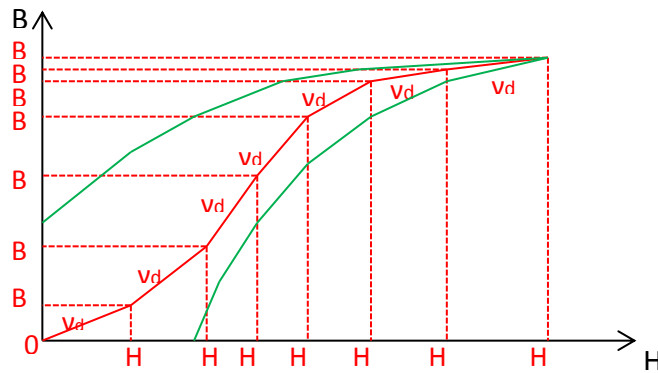


Рисунок 17. Кусочно-линейная аппроксимация характеристики намагничивания стали

На каждом из участков характеристики намагничивания зависимость напряжённости магнитного поля от магнитной индукции определяется выражением

$$\mu_0 \mathbf{H}(t + \Delta t) = \nu_d (\mathbf{B}(t + \Delta t) - \mathbf{B}(t)) + \mu_0 \mathbf{H}(t) , \quad (16)$$

где $\nu_d = 1/\mu_d$ – величина, обратная дифференциальной магнитной проницаемости на линейном участке

Для учёта влияния вихревых токов на магнитное поле используется соотношение

$$\mathbf{H}_B(t + \Delta t) = \frac{\sigma d^2}{12} \frac{\Delta \mathbf{B}}{\Delta t} , \quad (17)$$

где $\mathbf{H}_B$ – напряжённость магнитного поля, создаваемого вихревыми токами, σ – удельная электрическая проводимость вещества, d – толщина листа электротехнической стали.

После совмещения выражений для учёта гистерезиса и вихревых токов получается уравнение

$$\nabla \times \left(\frac{\sigma d^2}{12} \frac{\Delta \mathbf{B}}{\Delta t} + \mathbf{H}(t + \Delta t) \right) = \mathbf{J}(t + \Delta t) \quad (18)$$

Его решение позволяет получать картину переменного магнитного поля, источниками которого являются обмотки с токами, заменяемыми распределённой в пространстве плотностью тока.

Для решения задач по расчёту электромагнитного поля требуется построение конечно-элементной сетки расчётной области. Для этого в данной работе применяется метод, разработанный Галаниным М.П., Щегловым И.А. (Институт прикладной математики. М.В. Келдыша). Он основан на идее методов исчерпывания (другое название – «Продвижение фронта») в комбинации с *ostree*-алгоритме (трёхмерный случай применения алгоритма Шепарда) для построения узлов внутри расчётной области между её границей и трансформатором.

По результатам расчёта картины электромагнитного поля трансформатора осуществляется расчёт индуктивностей обмоток. Расчёт индуктивностей основан на использовании системы уравнений, каждое из которых определяет энергию магнитного поля одной или нескольких обмоток. Для двух обмоток система уравнений имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{L_1 I_1^2}{2} = \iiint_{V_1} \mathbf{J}_1(t) \mathbf{A}_1(t) dV = W_1' \\ \frac{L_2 I_2^2}{2} = \iiint_{V_2} \mathbf{J}_2(t) \mathbf{A}_2(t) dV = W_2' \\ \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + M_{12} I_1 I_2 = \iiint_{V_1} \mathbf{J}_1(t) \mathbf{A}(t) dV + \iiint_{V_2} \mathbf{J}_2(t) \mathbf{A}(t) dV = W' \end{array} \right. \quad (19)$$

В системе (19) первое уравнение – энергия магнитного поля при наличии токов только первой обмотки, второе – только во второй, третье – при наличии токах в двух обмотках одновременно. Такой подход позволяет достаточно просто определять собственные и взаимные индуктивности обмоток при любом их числе.

В четвёртой главе приведено обобщение методов, описанных в третьей главе применительно к моделируемому трансформатору («Симметрирующий фазопреобразователь») и приведена методика проведения моделирования его работы.

Электрическая схема данного трансформатора имеет вид
Процессы, протекающие в его электрической цепи (рисунок 18) можно описать уравнениями

$$\begin{cases} i_A(t) + i_B(t) + i_C(t) = 0 \\ u_{AC}(t) = i_A(t)r_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} - i_C(t)r_2 - \frac{d\Psi_2}{dt} \\ u_{BC}(t) = i_B(t)r_3 - i_C(t)r_2 + \frac{d\Psi_3}{dt} - \frac{d\Psi_2}{dt} \\ -u_4(t) = \frac{d\Psi_{4'}}{dt} + \frac{d\Psi_{4''}}{dt} + i_4(t)(r_{4'} + r_{4''}) \\ W_2 i_C(t) - W_3 i_B(t) = W_1 i_A(t) \end{cases}, \quad (20)$$

где $r_1, r_2, r_3, r_4', r_4''$ – активные сопротивления обмоток; W_1, W_2, W_3, W_4 – количества витков обмоток ($W_4 = W_4' = W_4''$). Знак «+» перед напряжениями означает, что к этим обмоткам подводится мощность.

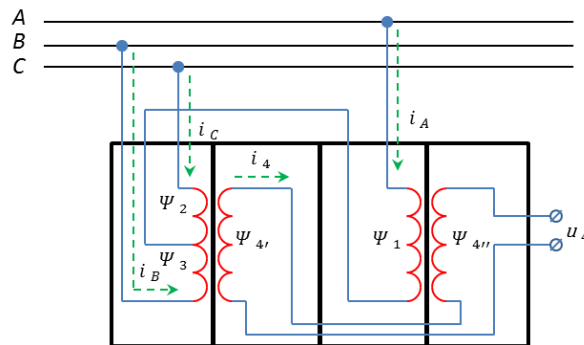


Рисунок 18 - «Симметрирующий фазопреобразователь». Схема цепей

Решение системы в общем случае можно получить только численными методами.

Потокосцепления связаны с напряжениями через уравнения

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_1}{dt} = u_{L_1} - u_{M_{12}} + u_{M_{13}} - u_{M_{14'}} + u_{M_{14''}} \\ \frac{d\Psi_2}{dt} = -u_{M_{21}} + u_{L_2} - u_{M_{23}} + u_{M_{24'}} - u_{M_{24''}} \\ \frac{d\Psi_3}{dt} = u_{M_{31}} - u_{M_{32}} + u_{L_3} - u_{M_{34'}} + u_{M_{34''}} \\ \frac{d\Psi_{4'}}{dt} = -u_{M_{4'1}} + u_{M_{4'2}} - u_{M_{4'3}} + u_{L_{4'}} - u_{M_{4'4''}} \\ \frac{d\Psi_{4''}}{dt} = u_{M_{4''1}} - u_{M_{4''2}} + u_{M_{4''3}} - u_{M_{4''4'}} + u_{L_{4''}} \end{array} \right. \quad (21)$$

В свою очередь, каждое из напряжений в (21) связано с соответствующей индуктивностью или взаимной индуктивностью дифференциальной зависимостью, например

$$u_{L_1} = \frac{d(L_1 i_A)}{dt} \quad (22)$$

После перехода к конечно-разностной форме записи по методу трапеций, уравнение было преобразовано к виду

$$u_{L_1}(t_{n+1}) = L_1(t_{n+1}) \left(\frac{2}{h} (i_A(t_{n+1}) - i_A(t_n)) - \frac{u_{L_1}(t_n)}{L_1(t_n)} \right) \quad (23)$$

Показано, что модель расчёта цепи основана на использовании уравнений (20) и (21) с помощью выражений (22) и (23). Результатом этого является система линейных алгебраических уравнений для определения мгновенных значений токов, напряжений и потокосцеплений для каждого момента времени.

В данной главе показано, что для решения уравнений цепи трансформатора относительно мгновенных значений токов напряжений и потокосцеплений требуются индуктивности обмоток как интегральных характеристик электромагнитного поля трансформатора в каждый момент времени.

Для этого применяется подход, основанный на расчёте векторного магнитного потенциала через решение уравнения

$$\nabla \times \left(\left(\frac{\sigma d^2}{12\Delta t} + v_d \right) (\nabla \times \mathbf{A}(t_{n+1}) - \nabla \times \mathbf{A}(t_n)) + \mathbf{H}(t_n) \right) = \mu_0 \mathbf{J}(t_{n+1}) \quad (24)$$

методом Галёркина на конечно-элементной сетке.

После обобщения всех описанных методов, алгоритм определения токов, напряжений и потокосцеплений обмоток симметрирующего фазопреобразователя, имеет вид:

1. Определение начальных индуктивностей по пробным токам (пробные токи определяются путём подбора так, чтобы магнитная индукция во всех элементах соответствовала первому отрезку линеаризованной характеристики намагничивания);
2. Получение новых значений токов и напряжения вторичной стороны с помощью итерационной процедуры;

3. Расчёт картины электромагнитного поля по определённым токам;
4. Проверка выхода значения магнитной индукции в каждом конечном элементе магнитопровода за пределы текущего отрезка характеристики намагничивания стали. В случае выхода значения за пределы отрезка производится переход на новый отрезок, что означает присвоение значению относительной магнитной проницаемости величины, соответствующей новому отрезку, и напряжённости магнитного поля величины, соответствующей началу нового отрезка. При этом значение напряжённости можно разложить по пространственным компонентам в пропорции, соответствующей предыдущей итерации;
5. Определение новых индуктивностей в случае возникновения описанного в предыдущем пункте события и определение энергий обмоток вне зависимости от изменений индуктивностей;
6. Возврат к пункту 2 и проведение новой итерации расчёта.

Заключение по работе

По итогам работы достигнуты следующие результаты и сделаны следующие выводы:

1. Разработана новая схема питания тяговой сети системы 25 кВ и 2х25 кВ на основе симметрирующего трансформатора новой конструкции (симметрирующий фазопреобразователь).
2. Новая схема питания требует меньшей мощности КУ ППК для 100%-й симметрии и 100%-й компенсации питающей сети при питании одного тягового плеча, что особенно эффективно на участках малой протяжённости;
3. Особенности новой схемы питания позволяют отказаться от чередования фаз напряжений в тяговой сети. В результате, из конструкции тяговых сетей исчезают нейтральные вставки, замыкание которых является распространённым повреждением, которое является двухфазным коротким замыканием с точки зрения энергетической системы;
4. При использовании предложенной в работе новой схемы питания тяговой сети переменного тока требуется меньшее число переключений установок КУ ППК для поддержания 100%-й симметрии и 100%-й компенсации в питающей сети при таких отклонениях токов плеч питания, что их суммарный ток остаётся неизменным.
5. Для моделирования работы предлагаемого симметрирующего трансформатора (симметрирующий фазопреобразователь) разработана математическая модель на основе моделей электрических цепей трансформаторов и методов расчёта переменных электромагнитных полей. Модель учитывает множество явлений и параметров, в том числе гистерезис и вихревые токи в сердечнике из шихтованной электротехнической стали. Пред-

ложены способы реализации алгоритмов в виде применения технологий высокопроизводительных вычислений на персональном компьютере для повышения скорости работы численной реализации компьютерной модели. Полученная модель может быть использована для исследования широкого класса электромагнитных устройств.

Основные положения диссертации и результаты исследований изложены в следующих работах:

**Научные публикации по теме диссертации в изданиях,
рекомендованных ВАК России**

1. Бадёр, М. П. Расчёт магнитного поля с помощью многоядерных процессоров [Текст] / М. П. Бадёр, А. А. Королев // Мир транспорта. – 2011. – Т. 34. – № 1. – С.4-9.
2. Бадёр, М.П. Моделирование симметрирующих трансформаторов, питающих тяговую сеть 27,5 кВ [Текст] / М. П. Бадёр, А. А. Королев // Электротехника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 2-3. – С.13-15.
3. Королев, А.А. Расчёт электромагнитного поля симметрирующих трансформаторов [Текст] / А.А. Королев // Электротехника и электрооборудование транспорта. – 2012. – № 2-3. – С.19-24.

Другие научные публикации по теме диссертации

1. Бадёр, М.П. Симметрирующая схема питания однофазных электрических нагрузок промышленной частоты [Текст] / М. П. Бадёр, А. А. Королев // Труды IX Научно-практической конференции «БЕЗОПАСНОСТЬ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ». – МИИТ. – 2008. – С. VI-5-VI-6.
2. Королев, А.А. Расчёт электротехнических устройств методом вторичных источников с применением высокопроизводительных вычислений [Текст] / А.А. Королев // Труды 53-й Научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук». Часть VIII. Проблемы современной физики. – МФТИ. – 2010. – С. 145-146.
3. Бадёр, М.П. Повышение симметрии напряжений в энергосистеме, питающей тяговую сеть переменного тока [Текст] / М. П. Бадёр, А. А. Королев // Наука, творчество и образование в области электроснабжения – достижения и перспективы. – ДВГУПС. – 2010. – С. –109-117.
4. Бадёр, М.П. Расчёт потерь энергии в конструкциях из шихтованной электротехнической стали с применением высокопроизводительных вычислений [Текст] / М. П. Бадёр, А. А. Королев // Eltrans'2011: тезисы докладов VI Международного

симпозиума, 25-28 октября 2011 г. Санкт-Петербург. – Петербургский государственный университет путей сообщения. – 2011. – С.10-11.

Королев Алексей Андреевич

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ ПО СИММЕТРИРОВАНИЮ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В СИСТЕМЕ ТЯГОВОГО
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат диссертации на диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Подписано к печати _____

Формат 60x80 1/16

Заказ № _____

Объём 1,5 п.л.

Тираж 80 экз.

УПЦ ГИ МИИТ, Москва, 127994, ул. Образцова, д. 9, стр. 9.