

На правах рукописи

МПБ

МОРОЗОВ ПАВЕЛ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И
КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА
СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и
электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

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

Научный руководитель: **МАНУСОВ Вадим Зиновьевич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **САЛЬНИКОВ ВАСИЛИЙ
ГЕРАСИМОВИЧ,**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Новосибирская государственная
академия водного транспорта», кафедра
электроэнергетических систем и
электротехники, профессор

САМОРОДОВ Герман Иванович,
доктор технических наук, профессор,
филиал ОАО «НТИ ФСК ЕЭС»
Сибирский научно-исследовательский
институт энергетики, научный
руководитель отдела новых технологий

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «20» июня 2013 г., в 12-00 на заседании диссертационного совета Д 212.173.01 при ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу:
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «17» мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимофеев И.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Электрическая энергия используется во всех сферах жизнедеятельности человека, а также непосредственно участвует при создании и транспортировке других видов продукции, влияя на их качество. В силу своей специфики понятие качества электрической энергии отличается от понятия качества других видов продукции. Каждый электропотребитель, в том числе и тяговые электропотребители, рассчитаны для работы при определенных параметрах электрической энергии, поэтому для их нормальной работы должно быть обеспечено требуемое качество. Таким образом, качество электроэнергии определяется совокупностью некоторых ее характеристик, при которых электроприемники могут нормально работать и выполнять заложенные в них функции. Особенностью электрической энергии является то, что ее качество в месте производства не гарантирует качества у самого потребителя. Качество электроэнергии до и после подключения электропотребителя к сети также может быть различно. Поэтому надлежащее качество электрической энергии – это один из главных показателей эффективности ее производства, передачи, распределения и потребления.

Важнейшими показателями качества электроэнергии являются несимметрия и несинусоидальность токов и напряжений в сетях трехфазного переменного тока. Эти показатели регламентируются соответствующими нормативными документами, в частности, действующим ГОСТ Р 54149-2010, который вступил в силу вместо ГОСТ 13.109-97. Превышение этими показателями допустимых значений снижает срок службы оборудования, увеличивает потери электроэнергии, способствует возникновению аварийных ситуаций на электростанциях и т.д. Как правило, эти явления обусловлены наличием нелинейных многофазных нагрузок различного назначения, в том числе электрифицированных скоростных железных дорог переменного тока. Эти нагрузки оказывают неблагоприятное влияние на режим работы трехфазной питающей сети электроэнергетической системы (ЭЭС) посредством кондуктивной помехи, распространяющейся через трансформаторные преобразователи числа фаз, в связи с чем, задача повышения качества электроэнергии является актуальной.

Наиболее важным моментом здесь является оценка качества электроэнергии в точках присоединения и на границе раздела систем внешнего электроснабжения и системы тягового электроснабжения. При этом в соответствии с Гражданским кодексом РФ электропотребители, питающиеся от той же точки присоединения, что и тяговые подстанции, имеют право требовать снижения оплаты за потребленную некачественную электроэнергию от своей энергоснабжающей организации. Основной составляющей качества электроэнергии для тяговых нагрузок является несимметрия нагрузки на вторичной стороне трансформаторов, поскольку она является двухфазной и неравномерной, что характеризуется коэффициентом несимметрии напряжения по обратной последовательности. В этом случае двигательные электроприемники, подключенные в этой точке, вынуждены значительно

увеличивать электропотребление по прямой последовательности, что снижает энергоэффективность электропотребителя. Наряду с этим, другим важнейшим показателем качества являются высшие гармонические составляющие, которые обусловлены нелинейностью нагрузки тяговых трансформаторов. Этот показатель называется коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения. Гармонические составляющие напряжения обусловлены активными мощностями по каждой гармонике, и их можно идентифицировать как коэффициенты той или иной гармонической составляющей напряжения. Снижение части некачественной электроэнергии на тяговых подстанциях позволит значительно улучшить электромагнитную совместимость скоростных железных дорог и питающих систем электроснабжения переменного тока.

Вопросы по улучшению качества электроэнергии актуальны не только в России, но и за рубежом. Об этом свидетельствуют регулярно проходящие конференции, посвященные вопросам электромагнитной совместимости и качества электроэнергии: международная конференция по большим электрическим системам, международная конференция по системам распределения электроэнергии и др. Вопросам улучшения качества электрической энергии посвятили свои работы такие ученые как Дж. Аррилага, Н.Акаги, Э.Хабигер, И.В. Жежеленко, Ю.С. Железко, В.П. Закарюкин, В.Н. Горюнов, Г.Н. Ворфоломеев, Г.И. Самородов, Ю.В. Демин, И.И. Карташов, В.В. Курбацкий, В.В. Литвак, Н.А. Мельников, К.Г. Марквардт, Н.С. Маркушевич, В.З. Манусов, В.А. Машкин, В.И. Пантелеев, Ю.К. Розанов, А.Г. Овсянников, В.Г. Сальников, В.М. Салтыков, Н.Н. Харлов, Ю.В. Целебровский, А.К. Шидловский, Н.И.Щуров и др.

Таким образом, проблема улучшения качества электрической энергии существует и требует новых решений по разработке технических средств, повышающих качество электроэнергии и тем самым электромагнитной совместимости, а также принципов их автоматического управления.

Данная диссертационная работа направлена на повышение электромагнитной совместимости и качества функционирования систем электроснабжения переменного тока за счет обеспечения симметрии напряжений и токов в трехфазной сети и их синусоидальности при неравномерном и быстром изменении тяговых электрических нагрузок.

Объектом исследований являются трехфазные электрические сети ЭЭС, имеющие точку присоединения к системам электроснабжения скоростных железных дорог 2×25 кВ, электрифицированных на переменном токе, с числом фаз не кратным трем.

Целью диссертационной работы является техническое усовершенствование системы электроснабжения переменного тока ЭЭС 2×25 кВ за счет симметрирования напряжений в трехфазной питающей сети с помощью трансформаторов Скотта и устройства уравнивания мощности на их вторичных обмотках.

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

1. Критический обзор и анализ существующих схемных решений систем

электроснабжения, использующих трансформаторные преобразователи разных видов на тяговых подстанциях для обеспечения симметрии в питающей трехфазной сети.

2. Сопоставление способов усовершенствования схемных решений для подстанций с числом фаз не кратным трем на основе уравнений магнитодвижущих сил обмоток трансформаторов и их математических моделей.

3. Разработка устройства уравнивания мощности на вторичных обмотках трансформатора Скотта для обеспечения симметрии в трехфазной сети при резко изменяющейся нагрузке.

4. Разработка системы управления устройством уравнивания мощности, обеспечивающей уравнивание мощности и синусоидальность кривой тока и напряжения в питающей трехфазной сети.

5. Исследование режимов работы трансформаторных подстанций, выполненных по схеме Скотта, при быстро изменяющихся тяговых нагрузках.

6. Исследование возможности применения четырехфазных линий электропередачи вдоль скоростной железной дороги в качестве питающей системы электроснабжения.

Методы исследований базируются на теории электромагнитных процессов, символическом методе расчета электрических цепей переменного тока, математическом моделировании, теории автоматического управления. При исследовании системы уравнивания мощностей на вторичных обмотках трансформатора Скотта использовались методы цифрового моделирования на основе пакета программ MATLAB Simulink.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель трансформаторного преобразователя из трех фаз в четное количество фаз не кратное трем, с устройством уравнивания мощности.

2. Четырехфазная система электроснабжения тяговых сетей переменного тока.

3. Математическая модель устройства уравнивания мощностей.

4. Система управления устройством уравнивания мощностей.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Выполнен полный сравнительный анализ возможных схем трансформаторных преобразователей для систем электроснабжения с числом фаз не кратным трем, отличающихся тем, что для каждого из типов преобразователей составлены уравнения магнитодвижущих сил с последующей оценкой уровня несимметрии напряжений в трехфазной сети.

2. Предложена принципиально новая система электроснабжения с четырехфазной линией электропередачи вдоль скоростной железной дороги, позволяющая вынести трансформаторы Скотта в высоковольтную питающую сеть, что обеспечивает полное симметрирование напряжений и токов с одновременным сокращением затрат на тяговые подстанции.

3. Разработано устройство уравнивания мощности на вторичных обмотках трансформатора Скотта, обеспечивающее симметрию и

электромагнитную совместимость за счет нераспространения кондуктивных помех в питающую трехфазную сеть.

4. Предложена и разработана система управления устройством уравнивания мощности, подавляющая гармонические составляющие высших порядков, что обеспечивает синусоидальность формы кривых тока и напряжения.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Разработана система моделирования трансформаторного преобразователя Скотта и устройства уравнивания мощности, предназначенная для оценки электромагнитной совместимости сетей трехфазного тока и систем электроснабжения с числом фаз, не кратных трем.

2. Показано, что при определенном алгоритме управления устройство уравнивания мощности на вторичной стороне трансформатора Скотта снижает несимметрию загрузки трехфазной сети, удовлетворяющую требованиям ГОСТ.

3. Разработана программная реализация приведенных математических моделей в рамках среды программирования MATLAB Simulink, позволяющая выполнять моделирование трансформаторных преобразователей как в реальных системах, так и в учебном процессе.

4. Предложена четырехфазная линия электропередачи на основе трансформаторов Скотта для электроснабжения железной дороги переменного тока 2×25 кВ, которая при сохранении однофазных трансформаторов позволит снизить несимметрию и потери мощности до уровней, допустимых ГОСТ

Реализация работы. Материалы работы излагались и используются в учебном процессе кафедры систем электроснабжения предприятий и кафедры электротехнических комплексов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет».

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили положительную оценку на ряде всероссийских и международных конференций: Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность», Томск, 2009; Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения», Новосибирск, 2010; Региональной научно-технической конференции «Наука, техника, инновации», Новосибирск, 2011.

Личный вклад. Решение поставленных научно-исследовательских задач, научные положения, выносимые на защиту, основные выводы и рекомендации диссертации принадлежат автору. Личный вклад в каждой работе, опубликованной в соавторстве, составляет не менее 50 %.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 18 печатных работ, из которых 6 статей в рецензируемых научных журналах, вошедших в перечень ВАК РФ, 12 научных публикаций в материалах научно-технических конференций и симпозиумов.

Структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 116 наименований и приложения. Диссертация изложена на 232 страницах основного текста, включая 95 рисунков и 8 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и научные задачи исследования; приведены основные научные результаты, выносимые на защиту; показана научная новизна исследований и оценена их практическая значимость; отражены уровень апробации и личный вклад соискателя в решении научных задач; даны структура и объем диссертационной работы, а также публикаций.

В первой главе сделан критический обзор способов обеспечения качества электрической энергии в электрических сетях. Рассматриваемые показатели качества электроэнергии описаны в ГОСТ Р 54149-2010. Нормы качества электроэнергии, устанавливаемые настоящим стандартом, обеспечивают уровень электромагнитной совместимости для кондуктивных электромагнитных помех в системах электроснабжения. Как известно, кондуктивная электромагнитная помеха распространяется по элементам ЭЭС (рис. 1).

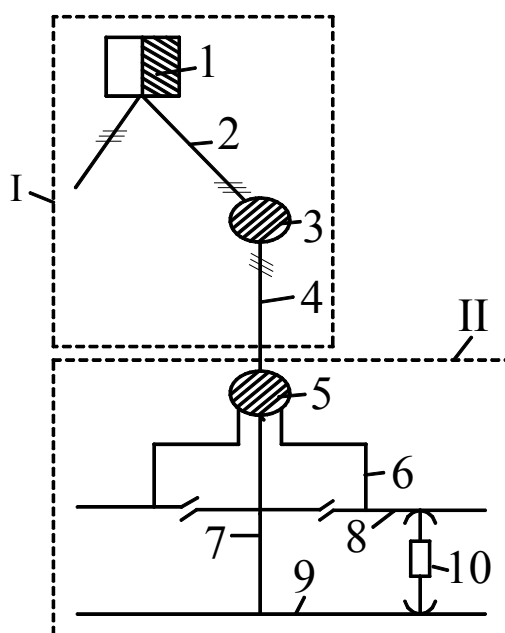


Рис. 1. Принципиальная схема питания электрифицированной железной дороги от электроэнергетической системы

I – внешнее электроснабжение: 1 – энергосистема; 2 – линия электропередачи энергосистемы; 3 – районная электрическая подстанция; 4 – линия электропередачи от районной подстанции к тяговой; II – тяговое электроснабжение: 5 – тяговая подстанция (точка присоединения); 6 – питающая линия; 7 – заземляющая линия; 8 – контактная подвеска; 9 – рельсы; 10 – электроподвижной состав (ЭПС).

Основным преимуществом системы однофазного тока промышленной частоты 50 Гц по сравнению с системой постоянного тока является возможность использования высокого напряжения в контактной сети 2×25 кВ. При этом тяговые подстанции превращаются в простые трансформаторные, а сечение контактной сети значительно уменьшается даже при больших расстояниях между подстанциями. Такие подстанции, как правило, применяются для присоединения автотрансформаторных систем электроснабжения скоростных железных дорог переменного тока, которые состоят из контактного провода, питающего провода и рельса (рис. 2).

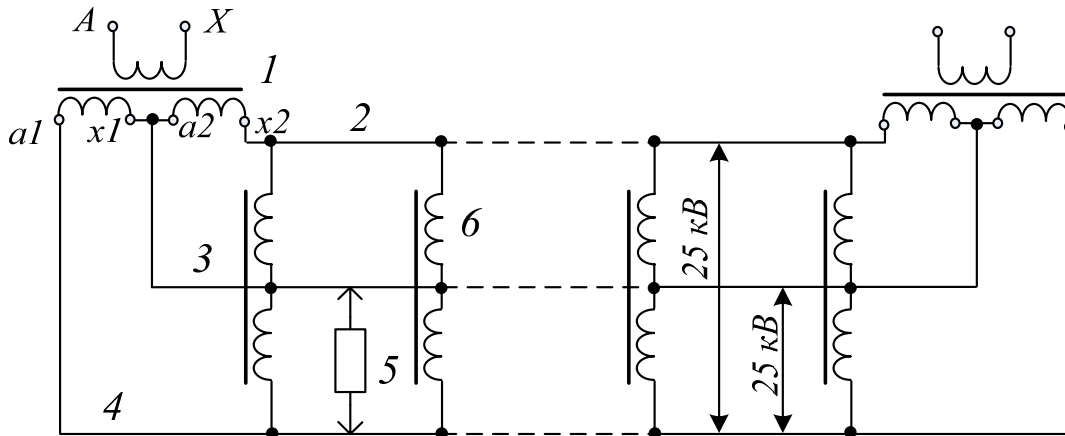


Рис.2. Принципиальная схема электроснабжения железной дороги переменного тока 2×25 кВ: 1 – однофазный трансформатор 110 (220) кВ; 2 – питающий провод 50 кВ; 3 – контактная подвеска 25 кВ; 4 – рельсы; 5 – электровоз; 6 – путевой автотрансформатор 50/25 кВ

Основное внимание уделяется несимметрии и несинусоидальности при электроснабжении многофазных нагрузок с числом фаз не кратным трем. Так, на железных дорогах переменного тока в питающей трехфазной системе нарушается симметрия токов и напряжений, что ведет к дополнительным потерям электрической энергии, к понижению мощности генераторов и двигателей или уменьшению срока их службы.

Степень несимметрии определялась с помощью метода симметричных составляющих по отношению составляющей обратной последовательности к составляющей прямой последовательности. Напряжение обратной последовательности в основном возникает из-за протекающих по сети токов обратной последовательности несимметричных нагрузок, в связи с чем была оценена степень несимметрии по току. Нормально допустимое значение коэффициента несимметрии в точке присоединения тяговой сети в трехфазной сети в течение не менее 95% каждых суток составляет 2%, а предельно допустимое – 4%. В соответствии с Правилами устройства системы тягового электроснабжения железных дорог РФ для снижения несимметрии тяговые подстанции переменного тока, в составе которых есть трехфазные и однофазные трансформаторы, необходимо подключать к линиям

электропередачи с циклическим присоединением наиболее загруженных фаз тяговых подстанций к разным фазам трехфазной сети.

Обоснована необходимость исследования точек присоединения таких нагрузок к первичной сети. Проанализировано влияние сложности структуры распределительных сетей высокого напряжения на качество электроэнергии в точках присоединения. Рассмотрены основные характеристики трансформаторов, входящих в состав точек присоединения. Кроме того, выполнен анализ результатов измерений токов и напряжений вблизи тяговой подстанции переменного тока «Сальская», предоставленных научным коллективом Регионального центра ресурсосбережения Томского политехнического университета. Он показывает, что степень искажения симметрии и синусоидальности время от времени превышает значения, приведенные в ГОСТ.

Таким образом, показана необходимость дополнительной научной проработки вопросов электромагнитной совместимости подстанций, используемых в качестве точек присоединения системы электроснабжения железных дорог, к высоковольтным электрическим сетям электроэнергетических систем.

Искажения режимных параметров в питающей электрической сети ЭЭС следует рассматривать как кондуктивные помехи, обусловленные влиянием процесса преобразования нечетного количества фаз в четное, не кратное трем.

Во второй главе выполнены исследования путей усовершенствования подстанций с числом фаз на вторичной стороне, не кратным трем. Известные способы усовершенствования подстанций сводятся к изменению их структуры. Рассмотрены подстанции с двумя однофазными трансформаторами, с двумя трехфазными трансформаторами, с однофазным и трехфазным трансформатором, а также с трехфазно-двухфазным трансформатором по схеме Вудбриджа.

Проведен детальный анализ режимов работы для каждого из перечисленных схемных решений подстанций с использованием символического метода расчета электрических цепей переменного тока и векторных диаграмм. Предложена упрощенная математическая модель для расчета токов в первичной ЛЭП на основе токов во вторичных цепях трансформаторов и оценки коэффициента несимметрии, так как известная модель, основанная на непосредственном применении законов электротехники, является слишком громоздкой и неудобной. В основе модели находятся уравнения намагничивающих сил, которые учитывают соотношения между числами витков в обмотках трансформаторов. Эти соотношения, в свою очередь, отражают свойства структуры трансформаторных преобразователей и их степень влияния на несимметрию. Основное внимание уделялось оценке в общем виде несимметрии трансформаторных преобразователей при равномерной загрузке вторичных обмоток. Было принято, что нагрузки имеют активно-индуктивный характер.

Обобщенная структурная схема трансформаторного преобразователя на подстанции приведена на рис. 3. Связь токов на первичной и вторичной сторонах описывается с помощью системы уравнений:

$$\dot{I}_A = K_{1nA} \cdot \dot{I}_{n1} + K_{1\kappa A} \cdot \dot{I}_{\kappa 1} + K_{2nA} \cdot \dot{I}_{n2} + K_{2\kappa A} \cdot \dot{I}_{\kappa 2}, \quad (1)$$

$$\dot{I}_B = K_{1nB} \cdot \dot{I}_{n1} + K_{1\kappa B} \cdot \dot{I}_{\kappa 1} + K_{2nB} \cdot \dot{I}_{n2} + K_{2\kappa B} \cdot \dot{I}_{\kappa 2}, \quad (2)$$

$$\dot{I}_C = K_{1nC} \cdot \dot{I}_{n1} + K_{1\kappa C} \cdot \dot{I}_{\kappa 1} + K_{2nC} \cdot \dot{I}_{n2} + K_{2\kappa C} \cdot \dot{I}_{\kappa 2}, \quad (3)$$

где $\dot{I}_{\kappa 1}, \dot{I}_{\kappa 2}$ - токи в контактных проводах; $\dot{I}_{n1}, \dot{I}_{n2}$ - токи в питающих проводах $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ - токи в фазах трехфазной сети; $K_{1nA}, K_{1\kappa A}, K_{2nA}, K_{2\kappa A}, K_{1nB}, K_{1\kappa B}, K_{2nB}, K_{2\kappa B}, K_{1nC}, K_{1\kappa C}, K_{2nC}, K_{2\kappa C}$ - обобщенные коэффициенты, которые учитывают соотношение чисел витков и напряжений на первичной и вторичной стороне. Эти соотношения определяются вариантом включения обмоток.

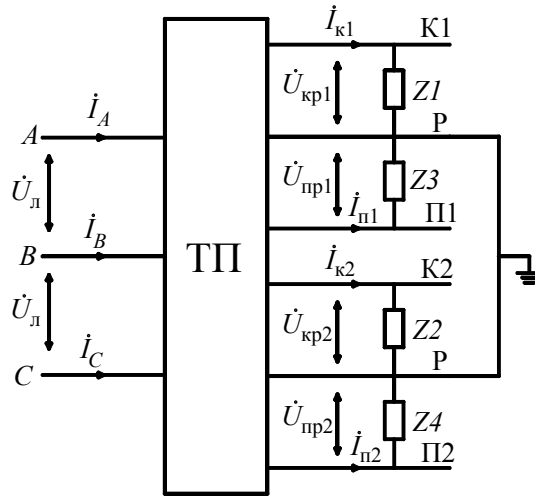


Рис. 3. Обобщенная структурная схема трансформаторного преобразователя на подстанции

При равномерных нагрузках на вторичной стороне формулы (1) – (3) принимают вид:

$$\dot{I}_A = K_A \cdot I \cdot \frac{U}{U_{\text{л}}}, \quad \dot{I}_B = K_B \cdot I \cdot \frac{U}{U_{\text{л}}}, \quad \dot{I}_C = K_C \cdot I \cdot \frac{U}{U_{\text{л}}}, \quad (4)$$

где I - модуль тока в нагрузке, $U, U_{\text{л}}$ - соответственно модули фазного и линейного напряжений на первичной стороне, K_A, K_B, K_C - коэффициенты связи между токами в нагрузках и токами в фазах на первичной стороне с учетом соотношения фазного и линейного напряжения. В процессе анализа режимов работы упомянутых выше схемных решений трансформаторных преобразователей вычислялся коэффициент несимметрии по току

$$K_I = \frac{I_{II}}{I_I} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где I_I и I_{II} - модули токов соответственно прямой и обратной последовательности фаз, а комплексы \dot{I}_I и \dot{I}_{II} определяются по формулам

$$\dot{I}_I = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C); \quad (6)$$

$$\dot{I}_{II} = \frac{1}{3} \cdot (\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C), \quad (7)$$

где $a = e^{j \cdot 120^\circ} = -0,5 + j \cdot 0,866$.

В табл. 1 приведены значения коэффициентов и параметров из формул (4)-(7) и коэффициента несимметрии по току для упомянутых схемных решений, применяемых на подстанции.

Таблица 1

Сравнение несимметрии на первичной стороне трансформаторов

№	Схемное решение для подстанции	K_A	K_B	K_C	I_I	I_{II}	$K_I, \%$
1	Два 1-фазных трансформатора	2,00	3,46	2,00	2,31	1,16	50
2	Два 3-фазных трансформатора	1,53	0,58	1,53	3,46	1,73	50
3	Один 3-фазный и один 1-фазный трансформатор	1,16	1,16	1,16	1,16	0	0
4	3-фазно-2-фазный трансформатор (схема Вудбриджа – четыре трехфазных трансформатора)	1,16	1,16	1,16	1,16	0	0

Было установлено, что большинство преобразователей на основе однофазных и трехфазных трансформаторов дает несимметрию по току не ниже 50%. Комбинированная подстанция из трехфазного и однофазного трансформатора, а также на основе схемы Вудбриджа, дает несимметрию по току 0 %, однако для трехфазного трансформатора в комбинированной схеме несимметрия составляет 100%. Недостатками таких схем является перегрузка одной из фаз и недоиспользование двух других фаз каждого из трехфазных трансформаторов, их излишняя громоздкость и невозможность обратного преобразования числа фаз. Кроме того, были проанализированы варианты снижения несинусоидальности токов с помощью трехфазных активных фильтров. Показаны ограничения по их применению, заключающиеся в том, что эти фильтры не обеспечивают распределение активных мощностей между обмотками трансформатора и не предназначены для устройств с числом фаз, не кратным трем.

В третьей главе рассматривается обеспечение симметрии загрузки фаз на подстанциях путем применения трансформаторов, включенных по схеме Скотта, которая свободна от недостатков схемных решений, рассмотренных во

второй главе. Доработка исходной схемы Скотта путем расщепления вторичных обмоток позволила осуществить преобразование трех фаз в четыре. Схема данного преобразователя приведена на рис. 4. Построенная для этой схемы векторная диаграмма на рис. 5 показывает, что равенство токов во вторичных обмотках и 90-градусный фазовый сдвиг между ними обеспечивает симметрию токов в первичных обмотках.

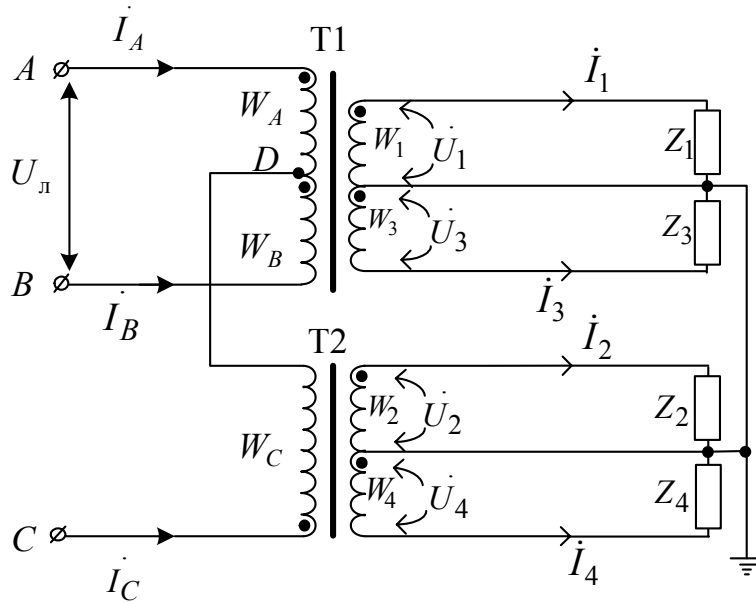


Рис. 4. Расчётная схема преобразователя числа фаз 3 → 4

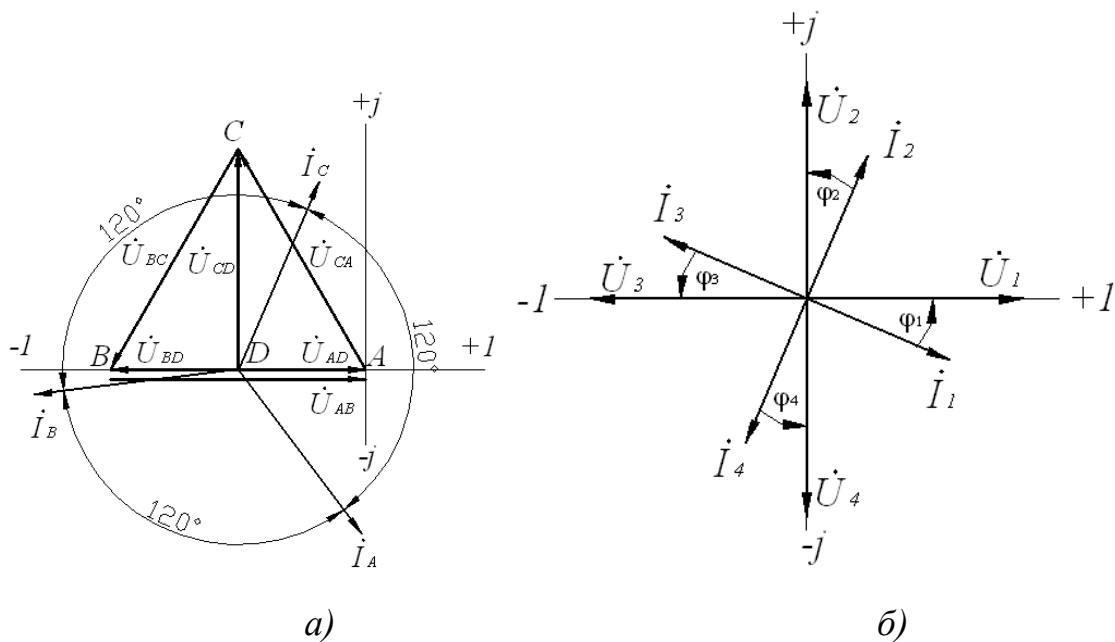


Рис.5 Векторные диаграммы преобразователя трёх фаз в четыре на основе схемы Скотта: а – векторные диаграммы первичной цепи; б – векторные диаграммы вторичных цепей трансформаторов

В связи с тем, что применение схемы Скотта в точке присоединения системы электроснабжения скоростной железной дороги означает необходимость замены существующих трансформаторов во всех точках присоединения, предложено использовать трансформаторы Скотта в качестве точек присоединения сети 110 кВ к сети 220 кВ, и организовать четырехфазную систему электроснабжения, что позволит сохранить существующие на большинстве подстанций однофазные трансформаторы (рис. 6)

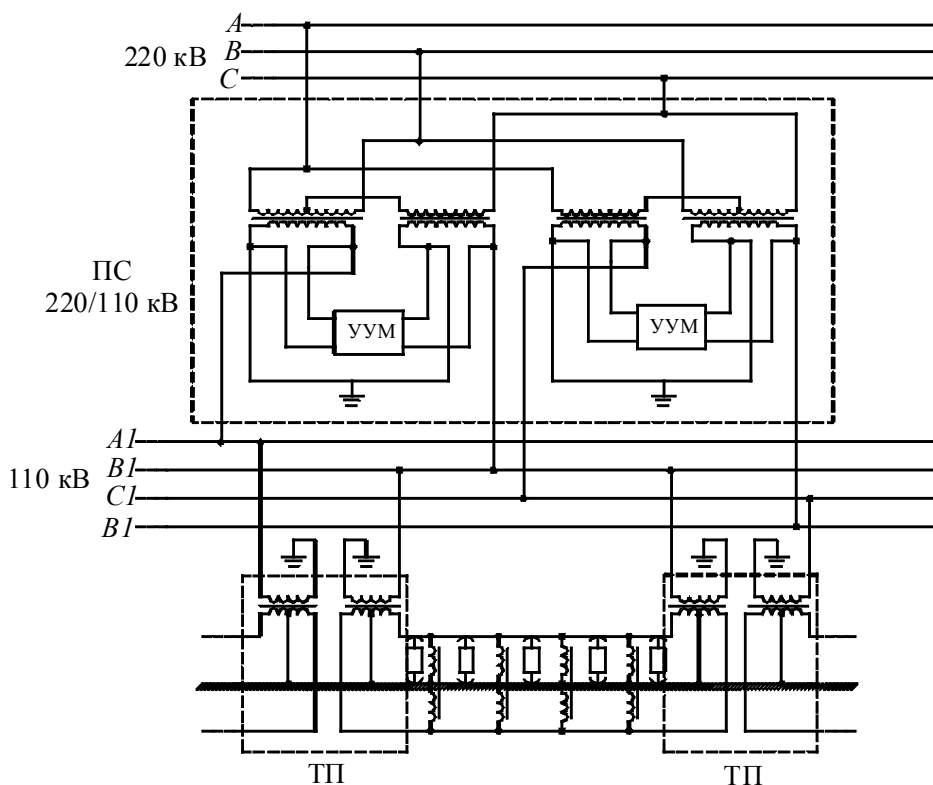


Рис. 6. Система электроснабжения с четырехфазной линией электропередачи

В четвертой главе проведено исследование трансформаторной подстанции на основе схемы Скотта при быстро изменяющихся нагрузках. Трансформаторные преобразователи, включенные по схеме Скотта, обеспечивают полную симметрию токов в трехфазной сети только при равных нагрузках в двух плечах вторичных обмоток. Именно при этих условиях обеспечивается равенство и взаимный 90-градусный фазовый сдвиг токов во вторичных обмотках и обеспечивается баланс мощностей, а, следовательно, симметрия в питающей сети.

Предложено подключать параллельно каждой из нагрузок устройство уравнивания мощностей (УУМ), которое равномерно распределяет мощность нагрузок между обмотками даже при резком изменении их сопротивлений, либо при отсутствии нагрузки на одной из вторичных обмоток. На рис. 7 приведена укрупненная схема подключения УУМ к двум фазам преобразователя. Данная схема расширяется для любого количества фаз на

вторичной стороне, например для четырех. Для этой схемы и нагрузок справедливо уравнение баланса мощностей

$$P_y = (P_{H2} - P_{H1}) / 2, \quad (8)$$

где P_{H1} , P_{H2} - мощности нагрузок, P_y - мощность УУМ.

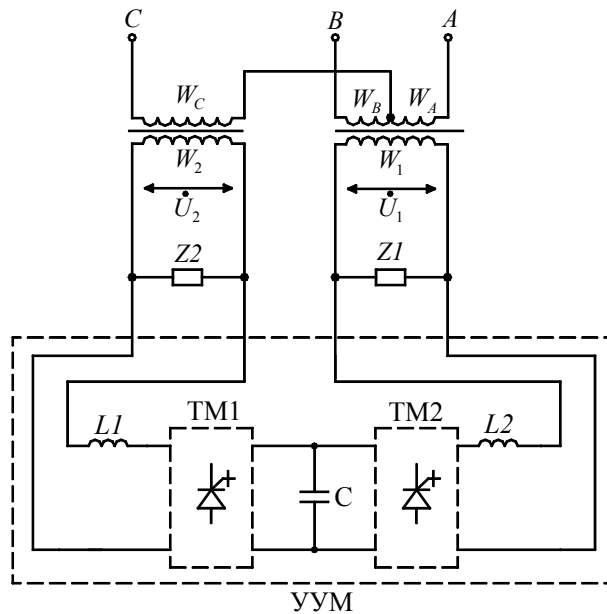


Рис. 7. Обобщенная схема включения УУМ

Центральным элементом УУМ является накопитель энергии C . Для распределения мощности между обмотками трансформаторного преобразователя служат два тиристорных моста (ТМ) и два реактора. Реакторы обеспечивают поддержание формы тока, близкой к синусоидальной. Для обеспечения большего количества уровней напряжения таких элементарных ячеек может быть больше двух.

Уравнивание мощностей сводится к уравниванию токов во вторичных обмотках трансформатора на уровне среднего арифметического между токами нагрузок и поддержанию их синусоидальной формы путем стабилизации постоянного напряжения на емкостном накопителе, что аналитически доказано в работе с помощью уравнений баланса мощностей методами математического анализа.

С учетом несинусоидальности тока в нагрузках на вторичных обмотках трансформатора корректирующий ток, формируемый УУМ для i -й обмотки, имеет следующий вид для одной из нагрузок

$$i_{yi}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_{ni} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t + \theta_{ni}) - I_{li} \cdot \cos(\theta_{li}) \cdot \sin(\omega t), \quad (9)$$

где I_{ni} и θ_{ni} - амплитуда и фаза n -й высшей гармоники тока нагрузки; I_{li} и θ_{li} - амплитуда и фаза первой гармоники тока нагрузки.

Полная энергия, запасенная в УУМ, не должна колебаться в течение периода, и должна удовлетворять следующему равенству

$$C \cdot \frac{U_C^2}{2} \Big|_t^{t+2\pi/\omega} = \int_t^{t+2\pi/\omega} U_S \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot i_{yi}(t) dt. \quad (10)$$

С учетом (10) получено выражение, которое показывает связь между напряжением на накопителе и током во вторичной обмотке трансформаторного преобразователя:

$$\Delta U_C = \sqrt{\frac{U_{Si} \cdot I_{Si} - U_{Si} \cdot I_{1i} \cdot \cos(\theta_{1i})}{C}} \cdot \Delta t, \quad (11)$$

где ΔU_C – изменение напряжения на емкостном аккумуляторе C на интервале времени Δt , U_{Si} – амплитуда напряжения, I_{Si} – амплитуда тока на i -й вторичной обмотке трансформатора Скотта, I_{1i} и θ_{1i} – амплитуда и фаза первой гармоники тока нагрузки, где $i = 1, 2$.

Равенство ΔU_C нулю означает отсутствие высших гармоник у тока I_{Si} . Следовательно, уменьшение изменения напряжения на емкостном накопителе до нуля в течение периода основной гармоники соответствует уменьшению до нуля энергии всех высших гармоник. Таким образом, подавление высших гармоник сводится к поддержанию постоянного напряжения на конденсаторе. Уравнивание мощностей сводится к поддержанию во вторичных обмотках трансформаторного преобразователя тока, равного среднему арифметическому токов в нагрузках.

Таким образом, для уравнивания мощностей во вторичных обмотках трансформаторного преобразователя и подавления высших токовых гармоник служит замкнутый алгоритм автоматического регулирования, который состоит из следующих основных шагов: а) измерение токов в нагрузках и напряжения на аккумуляторе; б) вычисление основной гармоники и суммы высших гармоник тока в нагрузке с помощью преобразования Фурье; в) вычисление ошибки напряжения на конденсаторе (отклонение от заданного постоянного значения); г) вычисление опорных синусоидальных токов в обмотках трансформаторного преобразователя; д) формирование таких управляющих ШИМ сигналов на управляющих входах коммутационных элементов, которые обеспечивают изменение тока в обмотках в такт с опорными токами в зависимости от ошибки по току.

Теоретические исследования трансформаторного преобразователя Скотта с УУМ, подключенного параллельно вторичным обмоткам, подтверждаются с помощью компьютерного моделирования в среде Simulink Sim Power. Основное внимание уделено моделированию вторичных обмоток трансформаторного преобразователя Скотта и УУМ при резко изменяющихся активно-индуктивных нагрузках. Улучшение работы УУМ возможно за счет

повышения частоты опорного сигнала, включение между обмотками трансформаторного преобразователя и реакторами резонансных LC-фильтров, увеличение количества уровней напряжения, формируемых УУМ.

Конденсаторная батарея емкостного накопителя выполнена по схеме со средней точкой. За счет средней точки схема формирует 5 уровней напряжения: $-2U_C$, $-U_C$, 0 , U_C , $2U_C$. Частота переключений тиристоров снижается за счет применения многоуровневой ШИМ с использованием четырех опорных треугольных сигналов, сдвинутых на угол 0 , 90° , 180° , 270° , с которыми одновременно сравнивается сигнал ошибки по току. В зависимости от количества опорных сигналов, не превысивших сигнал, из поисковой таблицы извлекается набор управляющих воздействий на тиристоры.

Проведенные исследования показали, что УУМ обеспечивает равенство токов в обмотках трансформаторного преобразователя и фазовый сдвиг между ними 90° при внезапном изменении тока нагрузки (рис. 8). После изменения нагрузки напряжение на конденсаторной батарее снижается не более чем на 5%, а токи в обмотках преобразователя Скотта одновременно плавно нарастают.

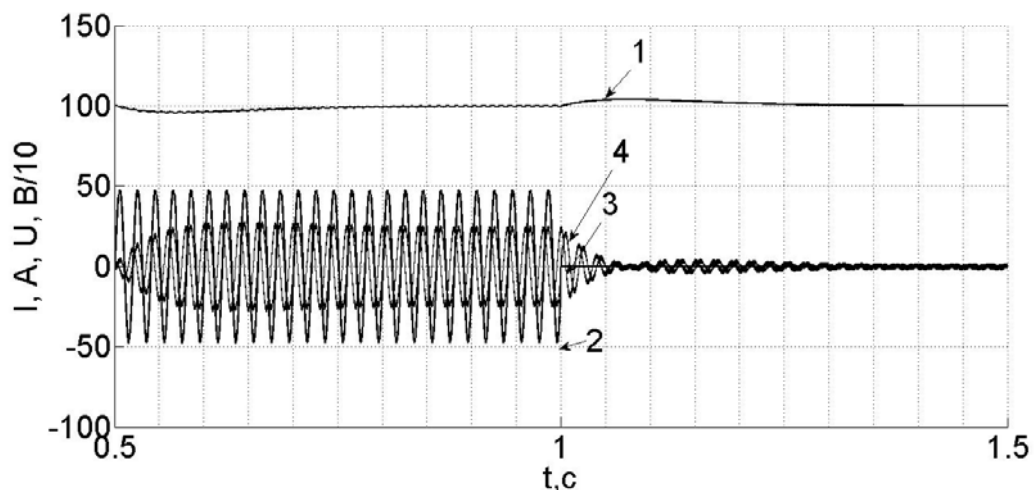


Рис. 8. Результаты моделирования УУМ

1- напряжение на накопителе энергии C , 2 – напряжение на нагрузке $Z1$, 3,4 – токи во вторичных обмотках трансформатора

Поскольку УУМ шунтирует обмотки трансформаторного преобразователя, то равенство токов означает равенство мощностей. В свою очередь, из равенства мощностей следует полная симметрия токов и напряжений в питающей трехфазной сети электроэнергетической системы.

Пятая глава посвящена оценке несимметрии параметров режима на подстанции в точке присоединения, которая характеризует электромагнитную совместимость двух- или четырехфазной системы с числом фаз, не кратным трем, с трехфазной питающей сетью ЭЭС.

Данные исследования были проведены на примере фрагмента Северо-Байкальского участка Байкало-Амурской магистрали (БАМ), где используется система электроснабжения переменного тока 2×25 кВ. Основное внимание

уделено оценке несимметрии по напряжению с учетом падения напряжения из-за транзита мощности. Электромагнитная совместимость автотрансформаторной системы тягового электроснабжения на основе подстанций с двумя однофазными трансформаторами с трехфазной сетью определяется потерями напряжения в энергосистеме и трансформаторах. Эти потери зависят от нагрузки подстанции, которая включает в себя автотрансформаторы и сами тяговые нагрузки (электровозы). Существенное влияние на электромагнитную совместимость двух однофазных трансформаторов с трехфазной сетью оказывает неравенство токов в тяговых нагрузках, так как оно порождает токовую несимметрию в трехфазной сети. Кроме того, неидеальность элементов межподстанционных зон, например, проводов, порождает несимметрию по напряжению, а также потери мощности в этих элементах. Сравнительная оценка несимметрии по току и напряжению с учетом примерных технических характеристик трансформаторов и элементов межподстанционных зон показала, что за счет применения трансформаторов Скотта вместо однофазных трансформаторов дают снижение коэффициентов несимметрии по току и напряжению более чем в 10 раз.

Для получения этих оценок выполнен расчет эквивалентного сопротивления трансформаторов и проводов в межподстанционной зоне. С учетом расчета параметров токораспределения найдены значения токов на шинах подстанций относительно тока электровоза, а также падения напряжений в линиях.

Степень снижения несимметрии по напряжению в основном зависит от длины проводов, идущих от подстанции более высокого уровня. Чем меньше длина проводов, тем меньше несимметрия по напряжению, порождаемая той же самой несимметрией по току. При расстоянии до подстанции более высокого уровня 300 км и более коэффициент несимметрии по напряжению для однофазных трансформаторов превышает значение, приведенное в ГОСТ, что требует либо строительства дополнительной подстанции, либо применение трансформатора Скотта на имеющейся подстанции. Использование трансформатора Скотта получается более предпочтительным, так как в данном случае не требуется полный цикл строительства подстанции.

Кроме того, выполнено примерное технико-экономическое обоснование применения трансформатора Скотта с УУМ в точке присоединения к трехфазной сети. В качестве издержек учитывались обслуживание подстанций, амортизационные отчисления, потери электроэнергии и штрафные надбавки к тарифу за износ оборудования. Расчеты показали, что срок окупаемости применения трансформаторов Скотта на подстанциях составляет около 3-5 лет.

Проведена оценка увеличения срока окупаемости из-за повышения структурной надежности за счет 100% резервирования и оптимизации межремонтных интервалов. С использованием типовых показателей надежности трансформаторов и коммутационных элементов подтверждено, что обеспечение вероятности безотказной работы, близкой к 0,99, влечет увеличение срока окупаемости не более чем на 1-2 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что система электроснабжения железных дорог переменного тока 2×25 кВ представляет собой совокупность специфических электропотребителей, существенным образом влияющих на показатели качества электрической энергии в питающей трехфазной сети ЭЭС. Искажения параметров режима в питающей электрической сети ЭЭС следует рассматривать как кондуктивные помехи, обусловленные влиянием процесса преобразования нечетного количества фаз в четное, не кратное трем.

2. Исследованы способы усовершенствования структуры трансформаторных преобразователей на тяговых подстанциях переменного тока с числом фаз на вторичной стороне, не кратным трем. Показано, что для однофазных и трехфазных трансформаторов несимметрия токов составляет более 50%. Подстанция с комбинированным включением однофазного и трехфазного трансформаторов дает несимметрию, близкую к нулю. Однако при этом наблюдается перегрузка одной фазы и недоиспользование двух других фаз трансформатора.

3. Доказано, что наиболее приемлемой структурой трансформаторного преобразователя с точки зрения электромагнитной совместимости, является схема Скотта, которая обеспечивает практически нулевую несимметрию токов фаз при обязательном условии равной загрузки его вторичных обмоток, что может быть обеспечено путем разработки устройства, обеспечивающего это условие.

4. При неравномерной нагрузке на вторичных обмотках трансформатора Скотта в условиях быстро изменяющихся тяговых нагрузок предложено применять устройство уравнивания мощности (УУМ), которое подключается параллельно вторичным обмоткам трансформатора Скотта. Такое устройство обеспечивает равенство величин токов на вторичных обмотках и постоянный фазовый сдвиг между ними 90° . Это обеспечивает полную симметрию токов в трехфазной сети при быстром изменении нагрузок.

5. Наилучшее качество регулирования токов в обмотках трансформатора Скотта обеспечивается устройством уравнивания мощности на основе использования 5-уровневых тиристорных мостов со средней точкой, что позволяет удовлетворить требованиям ГОСТ Р 54149-2010 к несимметрии и несинусоидальности.

6. Моделирование предлагаемой структуры преобразовательной тяговой подстанции на основе схемы Скотта вместе с устройством уравнивания мощности показало, что коэффициент несимметрии в трехфазной питающей сети и коэффициент несинусоидальности, характеризующий искажение формы кривой тока и напряжения, не превышают значений приведенных в ГОСТ.

7. Предложены двух- и четырехфазные линии передачи, которые обеспечивают наилучшую симметрию трехфазной сети за счет применения трансформаторов Скотта на высоковольтной подстанции. Такое решение рассмотрено на примере системы электроснабжения северобайкальского участка Байкало-Амурской Магистрали. Выполненные расчеты доказывают

технико-экономическую целесообразность выполнения трансформаторных подстанций питающей трехфазной сети 220/110 кВ на основе трансформаторов Скотта, что позволяет оставить неизменной структуру тяговых подстанций с однофазными трансформаторами. При этом срок окупаемости такого решения составляет 3 - 5 лет.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК

1. Морозов П.В. Применение трансформаторов Скотта на тяговых подстанциях электрических железных дорог. / П.В. Морозов, Г.Н. Ворфоломеев, С.А. Евдокимов, В.И. Сопов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.–2008.–№6.– С. 273 – 276.

2. Морозов П.В. Моделирование электромагнитного влияния скоростных железных дорог на системы электроснабжения / П.В. Морозов, В.З. Манусов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока.–2010.–№3. – С. 323 – 327.

3. Манусов В. З. Исследование методов снижения несимметрии нагрузки трехфазной сети на тяговых подстанциях скоростных железных дорог переменного тока / В. З. Манусов, П. В. Морозов // Известия Транссиба. - Омск, 2012. – Выпуск 2(10). – С. 87-93.

4. Манусов В. З. Снижение несимметрии в трехфазной сети, питающей двухфазную сеть тяговых подстанций скоростных железных дорог переменного тока / В. З. Манусов, П. В. Морозов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – Томск, 2012. – Т1(25). – Ч.1.– С.204-207.

5. Морозов П.В. Метод уравнивания мощностей на вторичных обмотках трансформаторов Скотта / В.З. Манусов, П.В. Морозов // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2012. – Т. 320. – № 4. Энергетика. – С. 62-67.

6. Морозов П.В. Применение преобразователей на основе трансформаторов Скотта для электроснабжения скоростных железных дорог переменного тока. / П.В. Морозов, В.З. Манусов, И.С. Крепышев // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2012. – №2. – С. 322-324.

Статьи, опубликованные в российских изданиях; материалы международных и всероссийских конференций

1. Морозов П.В. Система электроснабжения электрических железных дорог переменного тока с преобразователями на тяговых подстанциях из трех фаз в четыре на трансформаторах Скотта / П.В. Морозов, О.Л. Волкова, О.С. Иванько, Е.А. Юркова, Г.Н. Ворфоломеев // Радиоэлектроника, электроника и энергетика: Сб. тез. докл. 14 международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Москва, 28-29 февраля 2008 г.).– Москва, 2008.–С.193-194.

2. Морозов П.В. Четырехфазное напряжение для системы электроснабжения переменного тока с напряжениями 2*25 кВ / П.В. Морозов, Н.М. Ильиных, Г.Н. Ворфоломеев // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных (4–7 декабря 2008 г.) в семи частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Ч. 3. – С.94-95.

3. Vadim Z. Manusov, Pavel V. Morozov. Application of Scott-connected Transformers at the Traction Substations of AC Electric Railways (Применение трансформаторов, соединенных по схеме Скотта на тяговых подстанциях железных дорог переменного тока) // Proceedings of the 2009 International Forum on Strategic Technologies, Oct.21 – 23, 2009. – Ho Chi Minh City University of Technology, 2009. – P. 257-261. [Труды Международного форума по стратегическим технологиям, 2009]

4. Морозов П.В. Сравнение систем электроснабжения скоростных железных дорог для обеспечения качества электрической энергии / П.В. Морозов, В.З. Манусов // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов всероссийской научн.-техн. конф. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 54-57.

5. Морозов П.В. Электронная система управления мощностью для трансформаторных подстанций электрифицированных железных дорог переменного тока // Актуальные проблемы электронного приборостроения: материалы 10 международной конференции в 7 томах (22 – 24 сентября 2010). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010 – Т. 7 – С. 90-93.

6. Морозов П.В. Исследования влияния нагрузок с выпрямительно-инверторными преобразователями энергии на трехфазную сеть / П.В. Морозов, В.З. Манусов // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010. – С. 286 – 287.

7. Морозов П.В. Управление распределением электрической энергии на тяговых подстанциях переменного тока / П.В. Морозов, В.З. Манусов // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных (2–4 декабря 2011 г.) в шести частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – Ч. 2. – С.236–238.

8. Морозов П.В. Моделирование регулирования токов в системах тягового электроснабжения переменного тока / П.В. Морозов, В.З. Манусов // Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте'2011 (21-30 июня 2011 года): Сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. – Одесса, 2011. – Т.3. – С. 32-33.

9. Морозов П.В. Активные методы уменьшения влияния тяговых сетей переменного тока на первичную трехфазную сеть / П.В. Морозов, В.З. Манусов // Научные исследования и их применения Современное состояние и пути развития 2011 (4-15 октября 2011 года): Сб. науч. тр. по материалам междунар. науч.-практ. конф. – Одесса, 2011. – Т.1. – С. 71-72.

10. Морозов П.В. Сравнительная оценка систем электроснабжения электрических железных дорог переменного тока / П.В. Морозов, Г.Н. Ворфоломеев // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской

научной конференции молодых учёных (6–9 декабря 2007 г.) в семи частях.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – Ч. 3. – С.99-100.

11. Морозов П.В. Фазовый сдвиг между выходными напряжениями трансформаторного преобразователя числа фаз по схеме Скотта и его влияние на симметрию токов питающей трехфазной сети / П.В. Морозов, Ю.В. Аверина, А.А. Помазная, Г.Н. Ворфоломеев // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых учёных (4–7 декабря 2008 г.) в семи частях.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – Ч. 3. – С.85-86.

12. Морозов П.В. Определение коэффициентов установленной мощности трансформаторных преобразователей числа фаз, выполненных по схеме Скотта и схеме трёхстержневого трансформатора / П.В. Морозов, О.С. Иванько // Радиоэлектроника, электроника и энергетика, Сб. докл. 14 Международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов (Москва, 1-2 марта 2007 г.).– Москва, 2007.–С. 205- 206

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20,
Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1.5 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ . Подписано в печать .