

На правах рукописи

ВОЛКОВА ОЛЬГА ЛЕОНИДОВНА

**ВЫПРЯМИТЕЛИ С КОЛЬЦЕВЫМИ И ЛЕСТНИЧНЫМИ  
ВЕНТИЛЬНЫМИ СХЕМАМИ ДЛЯ СИСТЕМ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2011

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

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
Щуров Николай Иванович

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук, профессор  
Зиновьев Геннадий Степанович

доктор технических наук, профессор  
Горелов Валерий Павлович

**Ведущая организация:** ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск

Защита состоится « 15 » декабря г. в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Новосибирском государственном техническом университете по адресу:

630092, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан 11 ноября 2011 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

Нейман В.Ю.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Схемотехническое совершенствование преобразователей переменного тока в постоянный – одно из важнейших направлений научно-технических исследований. Переход от классических схем выпрямления к импульсным высокочастотным выпрямительно-инверторным преобразователям решает часть проблем, присущих классическим выпрямительным агрегатам (ВА), например, проблему повышения коэффициента мощности. Вместе с тем, схемы выпрямления с многофазными преобразовательными трансформаторами и выпрямителями электрических токов промышленной частоты еще длительное время будут применяться при преобразовании в отраслях с мощными и сверхмощными потребителями. Учитывая перспективы использования классических схем, следует обратить внимание на возможности повышения энергоэффективности выпрямителей, построенных по другим схемам. Причем повышение качества преобразования, напрямую связанное с экономичностью, может быть достигнуто схемотехническим совершенствованием ВА.

Отправной точкой для дальнейшего схемотехнического совершенствования служит теория структурного синтеза. Теория и практика структурного синтеза выпрямителей не нашли еще полного отражения в исследовательских работах, поэтому сбор, обобщение и систематизация имеющихся наработок по процедурам и методам структурного синтеза востребованы до сих пор. Актуальна также задача анализа схемных решений с целью выявления преферентных свойств выпрямителей с нестандартным построением элементов схемы ВА.

Создание многофазных преобразователей, как правило, с пульсностью не более 24, на фоне явного прогресса трансформаторостроения и достижений в совершенствовании силовых полупроводниковых приборов (СПП), а также улучшение технико-экономических показателей многопульсных выпрямителей возможно не только путем совершенствования мостовых схем, но и внедрением новых схемных решений, в частности кольцевых и лестничных вентильных схем (ВС). Поэтому исследование структурного синтеза и схемных решений, разработанных на основе этих методов, весьма востребованы. Существенный вклад в развитие методов структурного синтеза выпрямителей с кольцевыми и лестничными ВС внесли работы А.Г. Аслан-заде, Ю.В. Потапова, Ю.И. Игольникова, А.М. Репина, С.Н. Колева, А.К. Калчева, Н.И. Щурова, С.А. Евдокимова и др.

**Целью диссертационной работы** является дальнейшее исследование и разработка методов структурного синтеза и схемных решений выпрямителей с улучшенными технико-экономическими показателями для применения на электрическом транспорте.

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Анализ топологии выпрямителей с кольцевым и лестничным построением ВС, выбор схемных решений, рекомендуемых для электрического транспорта.
2. Систематизация неформализованных и частично формализованных методов структурного синтеза, в том числе методов агрегирования, схемотехнического перемещения и методов с использованием диаграмм, отражающих электромагнитные

процессы в преобразователях. Определение их достоинств и недостатков.

3. Разработка метода построения структур двухсекционного трансформаторного преобразователя числа фаз (ТПЧФ) с несимметричной формой выпрямленного напряжения секций, упрощающего структуру  $6(n+3)$  – пульсных выпрямителей.

4. Разработка методики определения углов проводимости вентилей и правильного соединения их в кольцо в выпрямителях с кольцевой ВС.

5. Анализ электромагнитных процессов в выпрямителях с кольцевыми ВС с учетом перспектив их внедрения на тяговых подстанциях (ТП) электрического транспорта.

6. Анализ электромагнитных процессов в выпрямителях с лестничной ВС и расчет преобразователя для усиления систем электроснабжения на грузонапряженных участках железных дорог.

7. Проведение модельных и экспериментальных исследований разработанных преобразовательных устройств, подтверждающих достоверность теоретических исследований электромагнитных процессов в выпрямителях с кольцевыми и лестничными ВС.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач применялись теоретические и экспериментальные методы исследований. В основу теоретических исследований положены методы теории электрических и магнитных цепей, метод кусочно-линейного припасовывания, методы структурного синтеза и анализа выпрямителей, геометрический метод представления синтезируемых моделей, методы алгебры, методы, основанные на использовании векторных и временных диаграмм. Расчеты и математические модели выполнены в пакетах-приложениях «MathCAD», «Micro-Cap» и «MATLAB». Достоверность исследований оценивалась сравнительным анализом по математическим моделям, компьютерным моделям, по сходимости результатов математического моделирования и экспериментов.

**Основные положения,** выносимые на защиту:

1. Результаты систематизации схем выпрямления и методов структурного синтеза.
2. Метод композиции несимметричных напряжений двух систем напряжений ТПЧФ.
3. Результаты сравнения 12-пульсных выпрямителей с мостовыми и кольцевыми ВС, а также модельно-экспериментальное описание преобразователей с кольцевым и лестничным построением ВС.

**Научная новизна диссертационной работы.**

1. Обобщены характерные свойства выпрямителей, объединенных топологиями ВС, выполненных кольцевыми или лестничными.
2. Выполнена систематизация неформализованных и частично формализованных методов структурного синтеза выпрямителей. При этом рассмотрены и усовершенствованы процедуры метода схемотехнических перемещений.
3. Разработан метод структурного синтеза, основанный на композиции несимметричных напряжений двух систем напряжений ТПЧФ.
4. Выведено уравнение внешней характеристики (ВХ) 12-пульсного выпрямителя с кольцевой ВС и выполнено сравнение ее с ВХ 12-пульсного выпрямителя с мостовой ВС.

**Практическая ценность результатов работы.**

1. Результаты обобщения схемных решений и систематизация методов структурно-

го синтеза схемных решений способствуют упрощению процедур выбора, а также разработке и расчету новых схем выпрямителей.

2. Обосновано внедрение на ТП электрического транспорта выпрямителей с кольцевыми и лестничными ВС вместо мостовых и лучевых.

3. Разработаны и предложены улучшенные схемные решения однофазных выпрямителей для систем управления электровозами переменного тока.

4. Разработана методика определения углов проводимости вентиляей в зависимости от их расположения в структуре вентиляного кольца.

**Реализация результатов работы.** Теоретические положения, методики расчета, экспериментальные установки, полученные в диссертационной работе, нашли применение в учебном процессе НГТУ по направлению 140600 – «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». Основные результаты работы были использованы в ходе выполнения работ по гранту молодым учёным мэрии г. Новосибирска при выполнении проекта № 1.2/11944 по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009 – 2011 годы)».

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: МНСК «Интеллектуальный потенциал Сибири» 22–23 мая 2007 г. (Новосибирск); научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 6–9 декабря 2007 г. (Новосибирск); МНСК «Интеллектуальный потенциал Сибири» 28–29 мая 2008 г. (Новосибирск); научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 4–7 декабря 2008 г. (Новосибирск); X международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2010 (Новосибирск), (The 10<sup>th</sup> International scientific-technical conference “Actual Problems of electronic instrument engineering proceedings” АРЕИЕ-2010); научно-технических семинарах кафедры «Электротехнические комплексы» НГТУ (2004 - 2008).

Основные научные результаты опубликованы в 12 научных работах, из них: 8 – в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 – в сборниках трудов конференций и 2 патента РФ на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 109 наименований и приложения. Общий объем 207 страниц машинописного текста, в том числе 200 страниц основного текста, включая 115 рисунков, 14 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность темы, отмечено современное состояние проблемы и определено направление данного исследования. Обоснована необходимость поиска новых подходов к построению схем вентиляных преобразователей переменного тока в постоянный. Сформулированы цель, задачи работы и пути их решения, описаны методы исследований.

**В первой главе** проведен *аналитический обзор* известных и новых схемных решений выпрямителей с нестандартной топологией ТПЧФ и ВС. В качестве

объекта исследований выбраны выпрямители с ВС, отличающимися от мостовых и лучевых структур, с так называемыми кольцевыми и лестничными ВС.

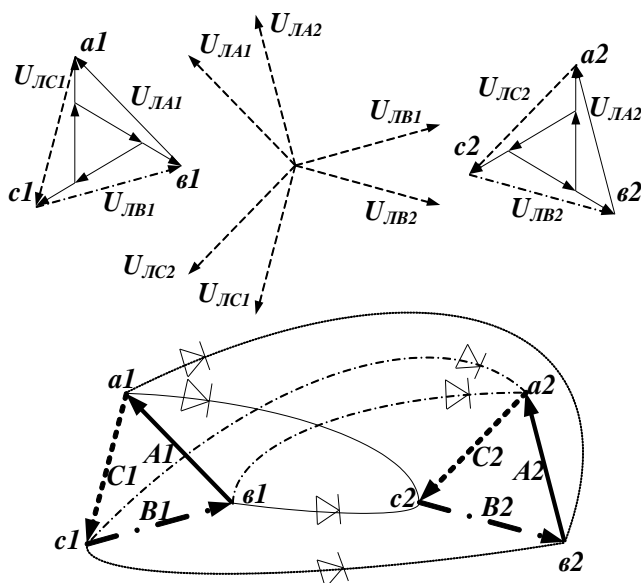


Рис. 1 – Кольцевые вентиляльные связи

Под кольцевой ВС понимается схема, в которой, в отличие от мостовой, смежные источники ЭДС ВО соединяются не через вентили анодных и катодных групп трехфазных мостов, а через вентиляльное кольцо (рис. 1) Под лестничной ВС понимается схема или часть схемы, вентили которой не соединены между собой, но соединяют противофазные выводы смежных источников ЭДС, принадлежащих одной фазе трансформатора(ов).

В работе рассмотрены *правила включения* 6-вентильных колец между смежными системами ЭДС. На рис.1 показаны именованные фазы одной из

питающих систем, каждая из которых связана однонаправленными вентилями с двумя фазами второй питающей системы, имеющими другое наименование. В общем виде для  $p$ -пульсных выпрямителей с кольцевой ВС при последовательном подключении систем с нарастающим (убывающим) углом сдвига по фазе между одноименными векторами линейных напряжений используется следующий алгоритм присоединения вентиляльных колец: каждая фаза любого трехфазного источника ЭДС ВО подключается к общей точке соединения одноименных электродов двух вентилях кольца (колец), вторые электроды которых соединяются с двумя фазами смежного источника, имеющими сдвиг  $\Delta\varphi = \pm [((p-2)/p)\pi \pm \pi/3]$  эл. град. относительно данной фазы. *Рассмотрены выпрямители* с лестнично-кольцевыми ВС, реализующие дискретное и плавное регулирование выпрямленного напряжения за счет ротации систем ЭДС и релейного регулирования. Один из выпрямителей приведен на рис.2, а в разработке 18-пульсного мостового и 24-пульсного выпрямителя с лестнично-кольцевой ВС участвовал автор.

По разработанному алгоритму включения вентилях количество каскадов преобразования меняется от одного до четырех. При любом их количестве в результате ротации систем ЭДС режим преобразования всегда 24-фазный. Выходные диаграммы приведены на рис.2. В *результате анализа электромагнитных процессов* обобщены характерные свойства выпрямителей. **Кольцевые** ВС в выпрямителях с выводами от *нулевых точек* систем ЭДС позволяют существенно уменьшить типовую мощность трансформатора. При использовании **кольцевых** ВС в выпрямителях последовательного типа с *двухполупериодной* работой источников ЭДС существенно уменьшается мощность потерь в вентилях. **Лестничные** ВС дают уменьшение потерь в вентилях относительно мостовых.

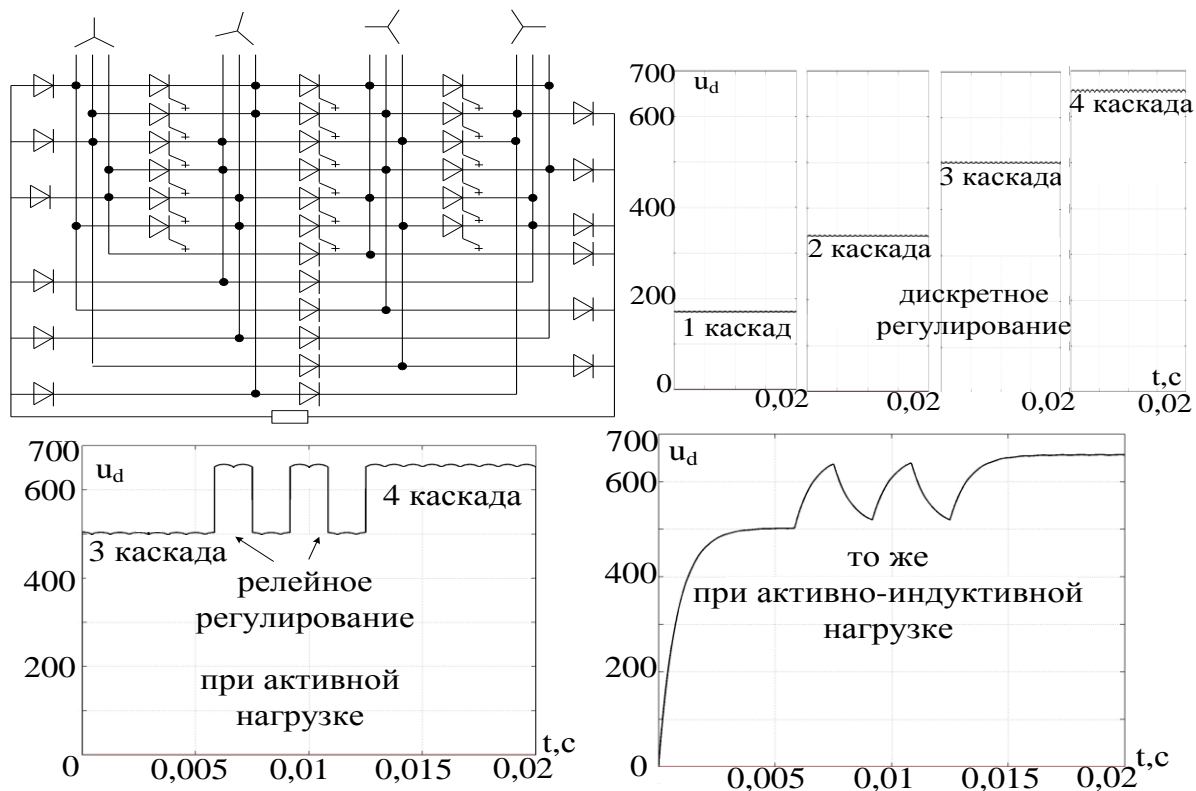


Рис. 2 – Схема и диаграммы выпрямленного напряжения ротационного выпрямителя

**Лестнично-мостовые** ВС позволяют осуществить принципиально новый вид регулирования выпрямленного напряжения за счет ротации систем ЭДС и релейного регулирования.

*Представлены* лестничные преобразователи однофазного тока, рекомендуемые для зонных выпрямителей электровозов переменного тока. **В главе** сделан выбор объектов исследования: 12-пульсного выпрямителя с кольцевой ВС (рис.10) и 12-пульсного с лестничной ВС (рис.13), а также четырехзонного выпрямителя (рис.15), которые предложены для применения на ТП и подвижном составе электрического транспорта и подлежат анализу в данной работе.

**Во второй главе** рассмотрены наиболее практичные методы структурного синтеза выпрямителей, в том числе неформализованные и частично формализованные. Продолжено развитие схемотехники ТПЧФ для многопульсных выпрямителей.

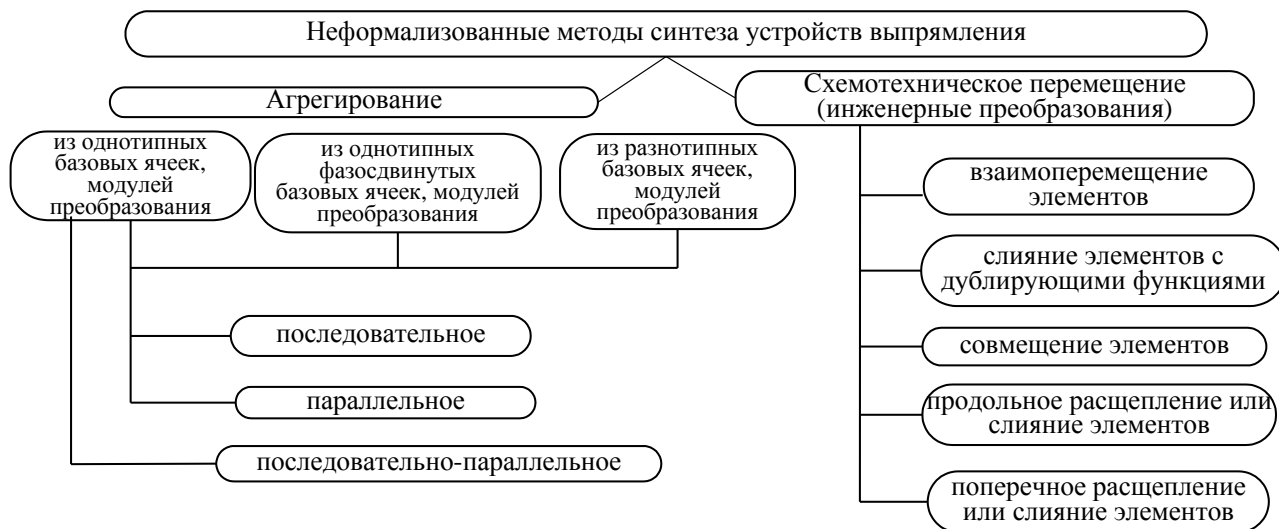


Рис. 3 – Неформализованные методы синтеза выпрямителей

К настоящему времени накопилось множество способов генерации многофазных преобразователей. Одни методы предназначены для синтеза ВС, другие – для синтеза ТПЧФ, а часть методов – для синтеза ВА в целом.

Из *неформализованных* (рис.3) основным методом является *метод агрегирования*, благодаря которому из простых преобразовательных структур строятся более сложные преобразователи с обретением новых качеств. Практический интерес вызывает метод синтеза схем путем модификации конфигурации элементов базовых схем, основная суть которого заключается в применении *процедур схмотехнических перемещений* элементов исходного преобразователя до получения структуры с новыми параметрами. Данный метод, предложенный А.Г. Аслан-заде, и в совершенствовании частных процедур которого участвовал автор, наглядно показан на примере преобразования схемы шестифазного двойного зигзага в кольцевую схему Ю.И. Горлова (рис.4). Схемообразующие процедуры методов агрегирования и схмотехнических перемещений не имеют функциональной привязки к состоянию электромагнитных процессов в синтезируемой схеме, как это присуще формализованным методам, например, методу, основанному на анализе графа изменения состояний. При этом не рассматривается также и графическая составляющая, визуально описывающая процесс изменения напряжений ТПЧФ временными или векторными диаграммами. В отличие от других методов синтеза, где конечная схема – результат, например, исходных графоаналитических выкладок; исходным материалом при методе схмотехнических перемещений служит конкретная, т.е. уже известная схема.

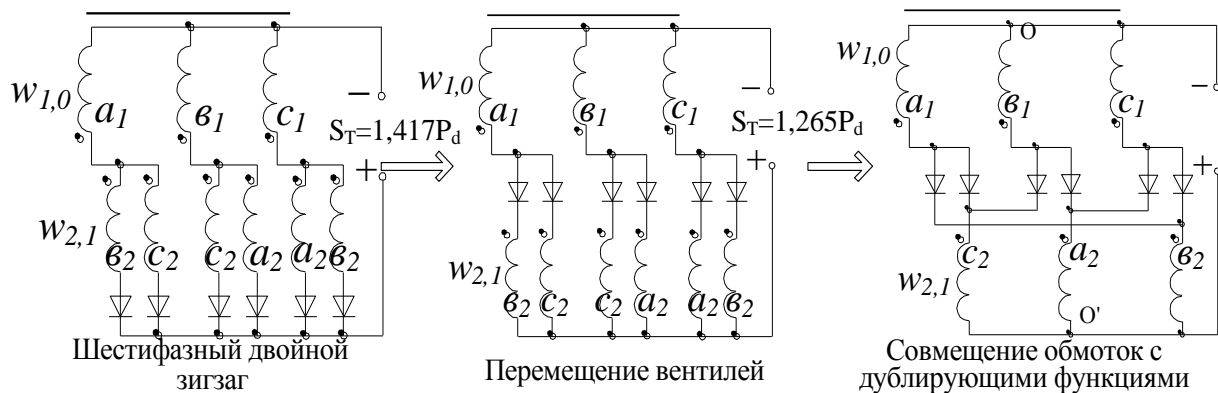


Рис. 4 – Схмотехническое преобразование шестифазного двойного зигзага в схему Ю.И. Горлова

Этот метод основан на трансформации исходных схем, причем параметры результирующей схемы заранее определить практически (без соответствующих интуитивных навыков) невозможно. Исключение из схемы ее элементов возможно только благодаря их дублирующим или превосходящим потребность (излишним) функциям. Создание новых связей происходит только за счет взаимного перемещения узловых точек.

Отдельную группу методов можно условно отнести к *частично формализованным методам* синтеза ТПЧФ и ВС, основанным на визуализации процессов (рис.5).

В основе метода *векторов частичных напряжений* лежит использование обобщенной векторной диаграммы, на которой представлены векторы частич-



ных напряжений ТПЧФ и векторы результирующих выпрямляемых напряжений. Данный метод широко использован в работах А.Г. Аслан-заде, а также описан в виде метода «кустовых» диаграмм в одной из работ А.М. Репина.

Особую группу методов составляют методы синтеза ТПЧФ с использованием



Рис. 5 – Полуформализованные методы синтеза выпрямителей

геометрических образов – *геометрические методы генерации схем*, перечисленные на рис.5. Найдены закономерности, связывающие геометрию (топологию) амплитудно-фазовых портретов (АФП) ТПЧФ с пульсностью выпрямителей при различных конфигурациях и сочетаниях исходных питающих систем ЭДС.

*Синтез 6-фазных несимметричных автономных систем ЭДС*

основан на взаимосвязи между топологическими размерами 6-фазных построений типа шестилучевой несимметричной звезды или полуправильного шестиугольника и фазностью преобразования; включает правила и соотношения, позволяющие осуществлять переходы от шестифазных звезд к фигурам шестиугольников. Полуправильные шестиугольники эквивалентны правильному треугольнику, т.е. при построении ТПЧФ на основе этих фигур, в магнитной системе трансформатора нет вынужденного намагничивания. На основе одной автономной 6-фазной системы строятся преобразователи только секторной топологии, обеспечивающей пульсность  $p = 6(n+1)$ , где  $n \in \mathbb{N}$ . *Синтез 12n-фазных преобразователей* относится к геометрическим методам синтеза ТПЧФ на основе  $n$  шестифазных АФП квазисекторной топологии с пульсностью выпрямителя  $p = 12n$ . *Метод смещения секторных топологий* представляет в основном теоретический интерес и показывает возможность симметричного выпрямительного процесса при асимметричных автономных системах питающего напряжения, например, 8- или 16-пульсного выпрямления.

*Метод композиции несимметричных напряжений*, идея которого и часть разработки принадлежит автору, применяется для построения двухсекционных ТПЧФ. Основан на синтезе временных диаграмм выпрямленных напряжений секций, сумма кривых которых дает симметричную форму выпрямленного напряжения с пульсностью  $p = 6(n + 3)$ . От временных диаграмм осуществляется переход к векторным в виде АФП ТПЧФ секторного типа, по которым строятся ВО. Примеры построений ТПЧФ для 24- и 30-пульсных выпрямителей показаны

ны на рис.6, рис.7. АФП несимметричных автономных систем вписываются в трехсекторные построения, образованные совмещением трех секторов в фигуру равностороннего выпуклого треугольника. На рис.6,б и рис.7,б приведены пары секторов 24- и 30-пульсных выпрямителей. Кривые выпрямленных напряжений секций показаны на рис.6,в и рис.7,в для развертки одного из секторов от  $0^{\circ}$  до  $60^{\circ}$ .

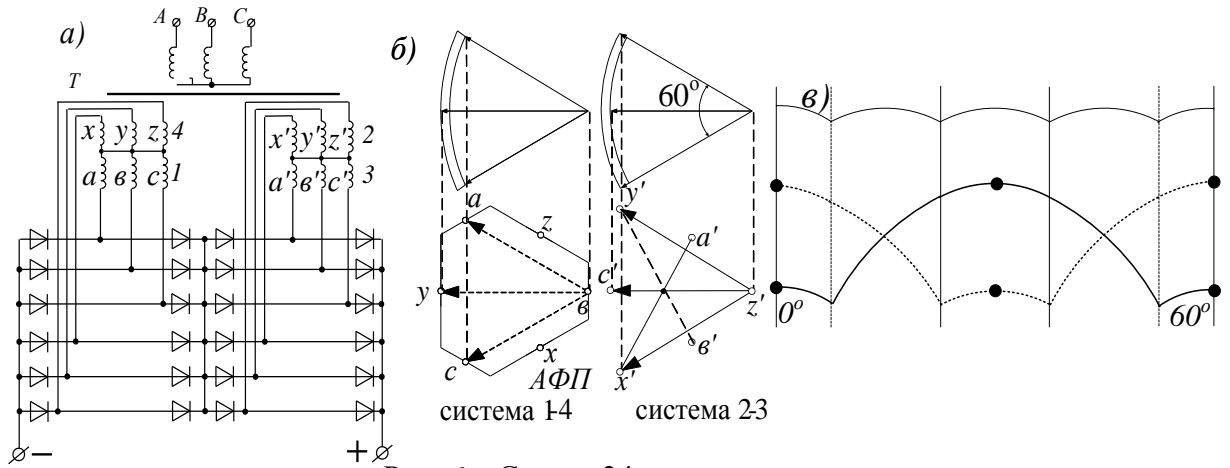


Рис. 6 – Синтез 24-пульсного выпрямителя

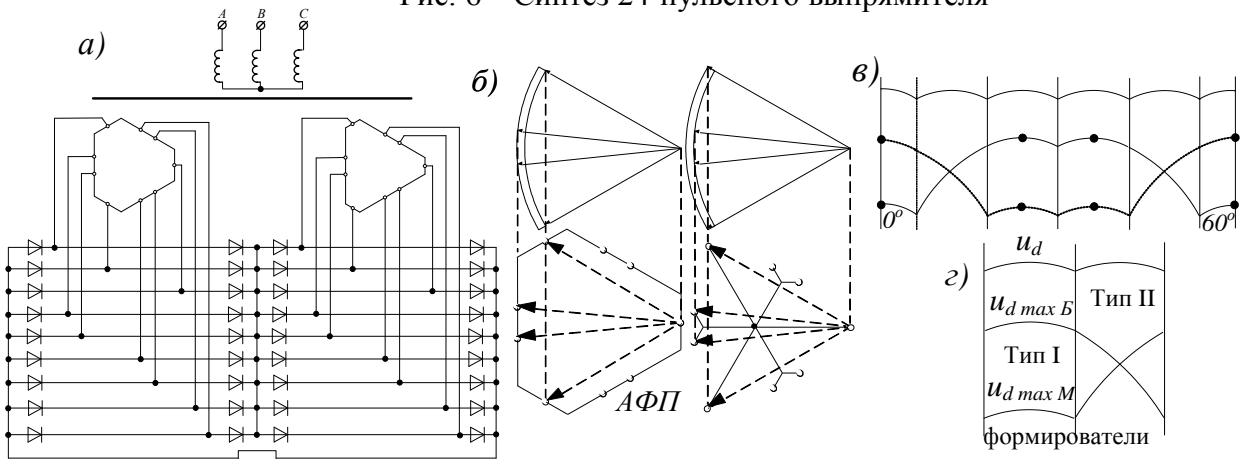


Рис. 7 – Синтез 30-пульсного выпрямителя (а-в) и формирователи импульсов (z)

Формирование кривой итогового выпрямленного напряжения обеспечивают два вида графических формирователей, представленных на рис.7,з.

Анализ АФП представленных преобразователей показал, что при синтезе кривых выпрямленных напряжений секций с помощью формирователей должны соблюдаться следующие очевидные взаимосвязанные правила:

**1.** Амплитудные значения несимметричных пульсаций (малых или больших) совмещаются с крайними лучами сектора. Условием циклической работы секторного преобразователя является обязательное размещение трех рабочих точек (РТ) в вершинах «выпуклого» треугольника (вершинные РТ). **2.** Половинки пульсаций по краям сектора представляются только формирователем **типа I**. Чтобы соблюсти равенство сторон (дуг) базовых для секторов секций треугольников каждое из несимметричных по форме напряжений секций должно иметь одинаковые амплитуды по краям секторов. **3.** Всякая несимметричная кривая в секторе зеркально симметрична относительно биссектрисы сектора. Формирователями **типа II** нельзя строить центральную пульсацию сектора. **4.** Формиро-

ватели **типа I** могут примыкать друг к другу при построении смежных пульсаций выпрямленного напряжения, а формирователи **типа II** разносятся на нечетное количество пульсаций. Исходя из анализа приведенных и других преобразователей с пульсностью  $p = 6(n + 3)$ , можно сделать вывод, что для практического применения в ВА наиболее подходят преобразователи для 24- и 30-пульсных выпрямителей. В первую очередь из-за того, что ВО могут быть полностью выполнены по схемам полуправильных шестиугольников.

Существенной отличительной особенностью преобразователя, приведенного на рис.6,а, является то, что при двухтрансформаторном исполнении преобразователя ВО в каждом трансформаторе можно выполнять одинаковыми: по любому из АФП в приведенных парах. Сетевые обмотки при этом должны обеспечить сдвиги одноименных фаз ВО в 30 эл. град.

Соотношение амплитуд малых и больших пульсаций выходных напряжений секций:

$$U_{d \max M} = U_{d \max B} (4 \cos^2 \pi / p - 3). \quad (1)$$

Используя данную формулу, можно определить все топологические размеры АФП, а соответственно, и размеры ВО при любом их исполнении.

К обособленным методам синтеза ВС относится метод, предложенный А.М. Репиным – *метод рекуррентных алгоритмов*. Он состоит из отдельных множеств процедур, проведение которых требует учета большого количества исходных параметров ТПЧФ.

*Метод вращающихся векторных диаграмм* (МВВД) позволяет строить ВС на основе любых систем ЭДС ТПЧФ без привязки к особенностям их построения. Для реализации метода используются элементарные процедуры перемещения АФП автономных систем ЭДС ТПЧФ на потенциальной плоскости друг относительно друга в фиксированные состояния, соответствующие соединению данных систем в реальном преобразовательном процессе. В каждом из фиксированных состояний определяется набор вентилях, соединяющих автономные системы между собой и с нагрузкой. Совмещение всех наборов вентилях образует ВС. Метод прост в реализации и универсален. При любых системах вторичных напряжений строится конкретная ВС с возможностью одновременного проведения ее анализа.

Аналогом данного метода, где информационными признаками являются не векторные диаграммы, а временные диаграммы, является *метод временных диаграмм* (МВД). Потенциальные возможности МВД проявились при построении принципиально нового класса преобразователей – ротационных выпрямителей.

Одним из первых, описанных в технической литературе, был *метод диагональных матриц*. Известен также *метод индексации*, основанный на зависимости топологии ВС от расстановки индексов напряжений систем ЭДС.

**В третьей главе** продолжено исследование 12-пульсного выпрямителя с кольцевой ВС. В работе проведен полный анализ электромагнитных процессов при общепринятых допущениях, обычных для начальной стадии исследований.

Получены основные соотношения для инженерных расчетов (табл.1). В развитие известных работ автором определены углы проводимости вентилях колец и разработано простое правило включения вентилях. Вентиля кольца, имеющие больший угол проводимости, равный  $\alpha = (2\pi/3 + 2\pi/p) - \pi/3$ , соединяют фазы смежных систем ЭДС с наибольшим фазовым сдвигом, а вентиля, имеющие меньший угол проводимости, равный  $\beta = (2\pi/3 - 2\pi/p) - \pi/3$ , соединяют фазы смежных систем ЭДС с наименьшим фазовым сдвигом. Данное правило отражено на векторных диаграммах (рис.8.)

Таблица 1 – Расчетные соотношения трансформатора и вентилях

Характеристики трансформатора			Характеристики вентилях по группам и углам проводимости												
			ток			$U_{Обрmax}$									
			сред-ний	дей-ствую-щий											
				АКГ	Кольцо		Кольцо	АКГ	Кольцо	Кольцо					
$U_{2Y}/U_{d0}$	$U_{2\Delta}/U_{d0}$	$I_{2Y}/I_d$	$I_{2\Delta}/I_d$	$I_{1Y}/I_d$	$S^*_1$	$S^*_2$	$S^*_T$	$120^\circ$ АКГ	$90^\circ$ Кольцо	$30^\circ$ Кольцо	$120^\circ$ АКГ	$90^\circ$ Кольцо	$30^\circ$ Кольцо		
0,214	0,37	0,816	0,4714	1,576 / $K_T$	1,0112	1,047	1,029	$0,333 I_d$	$0,25 I_d$	$0,8333 I_d$	$0,577 I_d$	$0,2886 I_d$	$0,524 U_d$	$1,013 U_d$	$1,013 U_d$

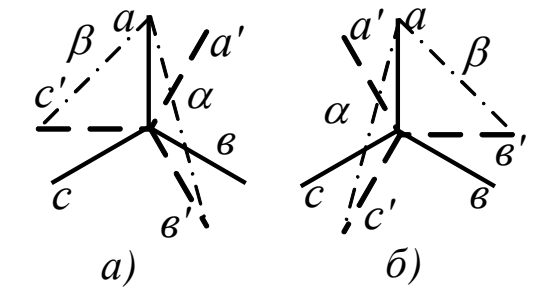


Рис. 8 – Схема соединения и определения углов проводимости

Выполнен анализ коммутационных процессов (рис. 9) в кольцевом преобразователе, который сопоставлен с результатами анализа мостовых схем в трудах М.Г. Шехтмана и А.В. Поссе, что дало основание утверждать о полной идентичности протекания электромагнитных процессов в мостовых и кольцевых схемах по входным и выходным цепям, цепям трансформатора, об идентичности ВХ в номинальных и перегрузочных режимах при прочих равных условиях. Это позволило сделать вывод о возможности применения кольцевых ВС вместо мостовых в мощных преобразователях ТП ж.-д. транспорта.

Подтверждено различие режимов работы вентилях смежных групп двух последовательно соединенных мостов и вентилях кольцевой группы. Отличающиеся элементы ВС могут быть представлены шестиполусником (рис.9,а) с

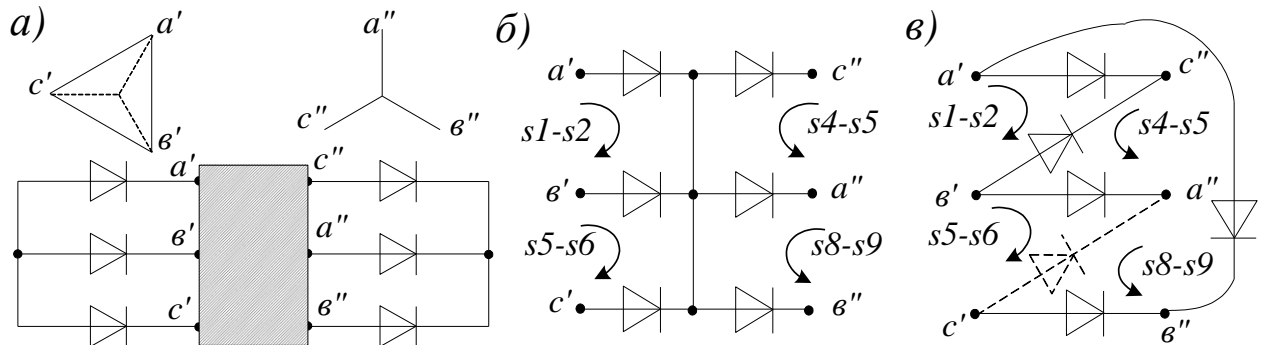


Рис. 9 – Шестиполусник вентилях моста и кольца, соединяющий смежные системы питания

одинаковыми входными и выходными параметрами, режимы работы элементов вне которого, как минимум при холостом ходе, одинаковы. Отмечена избыточность связей фаз смежных систем в мостовой схеме. Так, каждая фаза одной системы соединена со всеми фазами второй системы, причем, всегда через два вентиля (рис.9,б). В кольцевой ВС (рис.9,в) конкретная фаза одного источника соединена лишь с двумя фазами второго источника. Это не меняет порядка соединения источников ЭДС в процессе преобразования. Он такой же, как и в мостовой схеме, но средняя продолжительность работы вентилях кольцевой группы уменьшается в два раза.

Сравнение коммутационных процессов в шестиполюсниках, показало, что коммутационные цепи источников ЭДС совмещаются в вентилях кольца с некоторой паузой (рис.9,в), в то время как в мосту они не совмещены (рис.9,б).

Анализ коммутационных процессов по методике М.Г. Шехтмана сделан для номинальных и допустимых перегрузочных режимов. По расчетной схеме (рис.10) получены соотношения (2 – 7) для определения токов и напряжений исследуемой схемы в любом режиме и в любой ее точке.

Анализ проведен по двухтрансформаторной схеме, так как известно несколько подобных аналитических исследований двухмостовых схем, именно с двумя трансформаторами, что повышает объективность сравнения.

$$\begin{aligned} i_a'' &= i_3 - i_7 - i_8 & i_a' &= (i_2 + i_{12} - i_6 + i_1 - i_{11} - i_8)/\sqrt{3} & i_a &= i_a' + i_a''; \\ i_b'' &= i_5 - i_{11} - i_{12} & i_b' &= (i_7 + i_4 - i_{10} + i_6 - i_2 - i_{12})/\sqrt{3} & i_b &= i_b' + i_b''; \\ i_c'' &= i_9 - i_2 - i_4 & i_c' &= (i_{11} + i_8 - i_1 + i_{10} - i_7 - i_4)/\sqrt{3} & i_c &= i_c' + i_c'' \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u_a' - u_b' &= u_{10} - u_6 = u_2 - u_4 & u_a'' - u_b'' &= u_3 - u_5 = u_{11} - u_8 \\ u_b' - u_c' &= u_1 - u_{10} = u_7 - u_8 & u_b'' - u_c'' &= u_5 - u_9 = u_2 - u_{12} \\ u_c' - u_a' &= u_6 - u_1 = u_{11} - u_{12} & u_c'' - u_a'' &= u_9 - u_3 = u_7 - u_4 \\ u_a' + u_b' + u_c' &= 0 & u_a'' + u_b'' + u_c'' &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} u_3 + u_7 + u_{10} &= u_1 + u_3 + u_8 = u_5 + u_6 + u_{12} = -u_d \\ u_1 + u_5 + u_{11} &= u_4 + u_9 + u_{10} = u_2 + u_6 + u_9 = -u_d \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} i_3 + i_5 + i_9 &= i_1 + i_6 + i_{10} = I_d \\ i_2 + i_4 + i_7 + i_8 + i_{11} + i_{12} &= I_d \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} e_a - e_b &= u_3 - u_5 + \sqrt{3}A \cdot x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_2 + i_{12} - i_6) + x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_3 - i_7 - i_8 - i_5 + i_{11} + i_{12}) \\ e_b - e_c &= u_5 - u_9 + \sqrt{3}A \cdot x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_4 + i_7 - i_{10}) + x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_2 + i_4 + i_5 - i_9 - i_{11} - i_{12}) \\ e_c - e_a &= u_9 - u_3 + \sqrt{3}A \cdot x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_8 + i_{11} - i_1) + x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_7 + i_8 + i_9 - i_2 - i_3 - i_4) \end{aligned} \quad (6)$$

$$e_a - e_b = \frac{1}{\sqrt{3}}u_{10} - \frac{2}{\sqrt{3}}u_6 + \frac{1}{\sqrt{3}}u_1 + A \cdot x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_3 - i_7 - i_8 - i_5 + i_{11} + i_{12}) + \sqrt{3}x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_2 + i_{12} - i_6);$$

$$\begin{aligned}
e_b - e_c &= -\frac{2}{\sqrt{3}}u_{10} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_6 + \frac{1}{\sqrt{3}}u_1 + A \cdot x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_2 + i_4 + i_5 - i_9 - i_{11} - i_{12}) + \sqrt{3}x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_4 + i_7 - i_{10}); \\
e_c - e_a &= \frac{1}{\sqrt{3}}u_{10} + \frac{1}{\sqrt{3}}u_6 - \frac{2}{\sqrt{3}}u_1 + A \cdot x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_7 + i_8 + i_9 - i_2 - i_3 - i_4) + \sqrt{3}x_\gamma \frac{d}{d\vartheta} (i_8 + i_{11} - i_1).
\end{aligned} \quad (7)$$

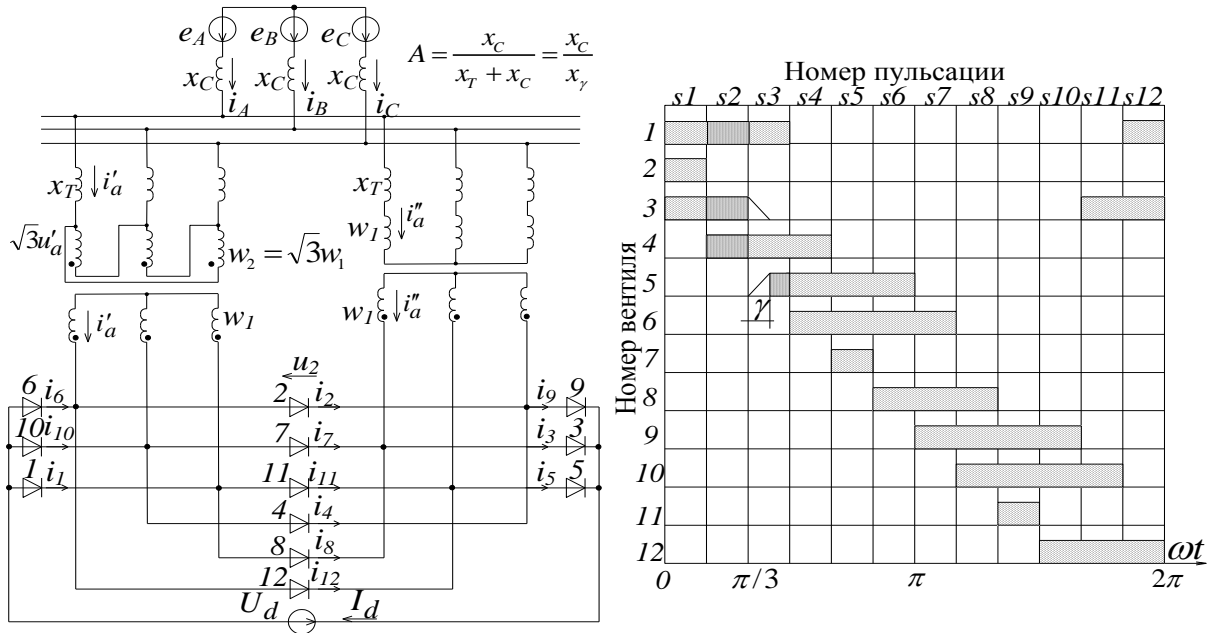


Рис.10 – Расчетная схема и диаграмма включения вентиляей

С учетом индуктивностей трансформатора и сети, лианеризации вольтамперной характеристики вентиля двумя взаимоперпендикулярными прямыми, методом кусочного припасовывания получены функции токов и напряжений, например, напряжения вентиляей, выпрямленного напряжения, коммутационного тока в режиме проводимости 4-х вентиляей (в мостовых схемах – режим проводимости 5 вентиляей). На диаграмме работы вентиляей (приведенной на рис.10 для режима ХХ) рассмотрен интервал, соответствующий  $\vartheta \in [\pi/3; \pi/3 + \gamma]$ . В этом интервале получены, например: напряжения на вентиляях  $u_9 = (3/2) \cdot E_m \cos(\vartheta + \psi + 2\pi/3)$ ,  $u_{10} = \sqrt{3} \cdot E_m \cos(\vartheta + \psi + 2\pi/3)$ ; выпрямленное напряжение  $u_{d4} = [(2\sqrt{3} + 3)/2] \cdot E_m \cos(\vartheta + \psi - \pi/3)$ ; ток коммутирующего вентиля  $i_3 = (\sqrt{3}E_m / 2x_\gamma) [\cos(\vartheta + \psi - \pi/3) + C_4]$ . Рассматривая **режим 3-4**, например, на интервалах, приведенных на рис.11, получим уравнение ВХ

$$6x_\gamma I_d + \pi U_d = 6\sqrt{3}E_m \cos \alpha; \quad (8)$$

выпрямленное напряжение

$$U_d = (3\sqrt{3}E_m / \pi) [\cos \alpha + \cos(\alpha + \gamma)]; \quad (9)$$

и выпрямленный ток

$$I_d = (\sqrt{3}E_m / 2x_\gamma) \cdot [\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma)]. \quad (10)$$

Приняв  $\gamma = 30$  эл. град., получим уравнение граничного режима

$$\left[ 4(\sqrt{3} + 2)/3 \right] \cdot x_\gamma^2 \cdot I_d^2 + \left[ \pi^2(2 - \sqrt{3})/27 \right] \cdot U_d^2 = E_m^2, \quad (11)$$

не отличающееся от известных уравнений для мостовых схем. В соответствии с уравнением ВХ и уравнением граничного режима построено семейство ВХ для режимов 3, 3-4 и 4, вплоть до режима 4-5. Начиная от режима ХХ (режим 3) до начала режима 4, когда угол коммутации становится и остается равным 30 эл. град., при дальнейшем увеличении тока нагрузки осуществляется режим 3-4. Угол  $\gamma$ , как для кольцевого, так и для мостового выпрямителя с неуправляемыми вентилями определяется:

$$\cos \gamma = 1 - \left(2/\sqrt{3}\right) \cdot I_d^* \quad (12)$$

где  $(I_d^* = [x_\gamma / E_{2m}] \cdot I_d)$ , а  $E_{2m}$  – амплитуда напряжения вторичной обмотки на холостом ходу. В режиме 3-4 ВХ прямолинейна вплоть до точки В (рис.12).

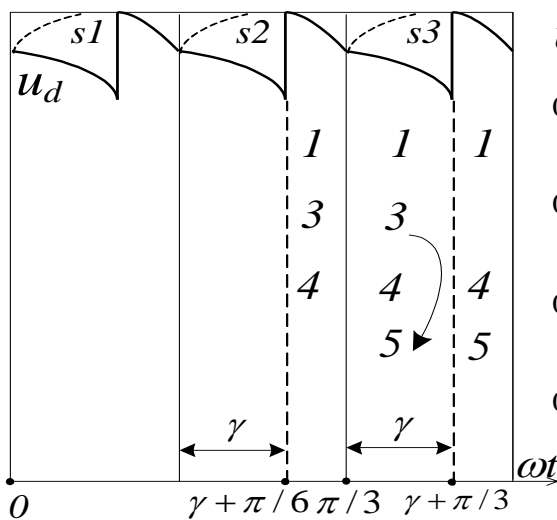


Рис. 11 – Интервалы коммутации

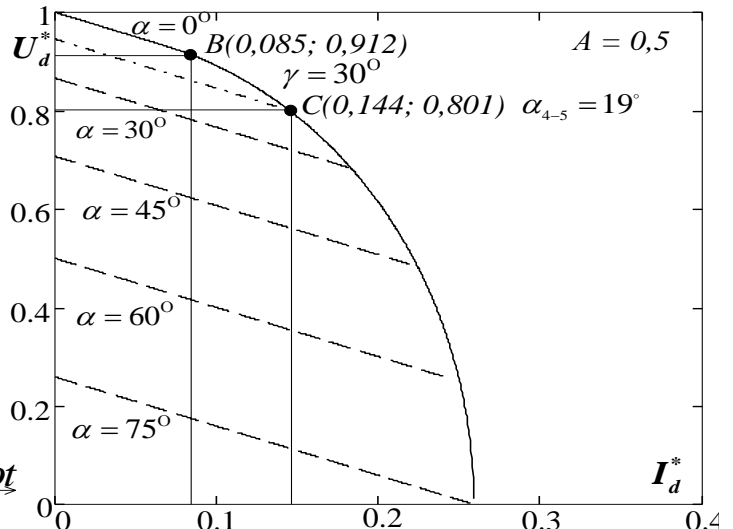


Рис. 12 – Внешняя характеристика

Как показали расчеты, для выпрямителя ТП ж.-д. транспорта при выборе  $x_T \% = 9$ ;

$$U_{2m} = \sqrt{2}U_2 = \sqrt{2} \cdot 706 = 998,7 \text{ В};$$

$$I_{дном} = 3150 \text{ А};$$

$$I_{2ном} = 0,78I_{дном} = 2457 \text{ А} \quad \text{получим} \quad x_T = \frac{x_T \% \cdot E_{2m}}{100\sqrt{2}I_{2ном}} = \frac{9 \cdot 998,7}{100\sqrt{2} \cdot 2457} = 0,02586 \text{ Ом}.$$

Тогда в соответствии с  $I_{дном}^* = (x_\gamma / E_{2m}) \cdot I_{дном}$  получим:

$$I_{дном}^* = \frac{0,02586 \cdot 3150}{998,7} = 0,0815 \text{ о.е.}, \quad \text{т.е. номинальный ток соответствует линейно-}$$

му участку ВХ, так как координаты точки В (0,085;0,912). Режим, когда угол  $\gamma$  не изменяется, как показали расчеты, существует вплоть до точки С (0,144;0,801), определяемой вынужденным углом задержки включения вентилей  $\alpha_{4-5}$ . Данный предельный угол определен из условий включения в режим проводимости пятого вентиля и совпадает с углом, приведенном в работе М.Г. Шехтмана для режима работы с шестью вентилями:  $\text{tg} \alpha_{4-5} = \sqrt{3}A/(4-3A)$ . Этот угол зависит от коэффициента взаимовлияния  $A$ , который определяется из соотношений индуктивности сети и трансформатора. Точка нагрузки движется по эллипсу, построенному по формуле (11). **Проведен анализ электромагнит-**

ных процессов в 12-пульсном выпрямителе с лестничной ВС (рис.13). Доказано, что в отличие от известных схем с несимметричными 6-фазными системами, свойством данной схемы является равенство параметров цепей тока в межкоммутационные интервалы, отсутствие потоков вынужденного намагничивания и относительно небольшая типовая мощность. Для применения схемы в ВА электрического транспорта рационально использовать в ней два трансформатора от выпрямителей, выполненных по 6-пульсным нулевым схемам с уравнивающим реактором (УР).

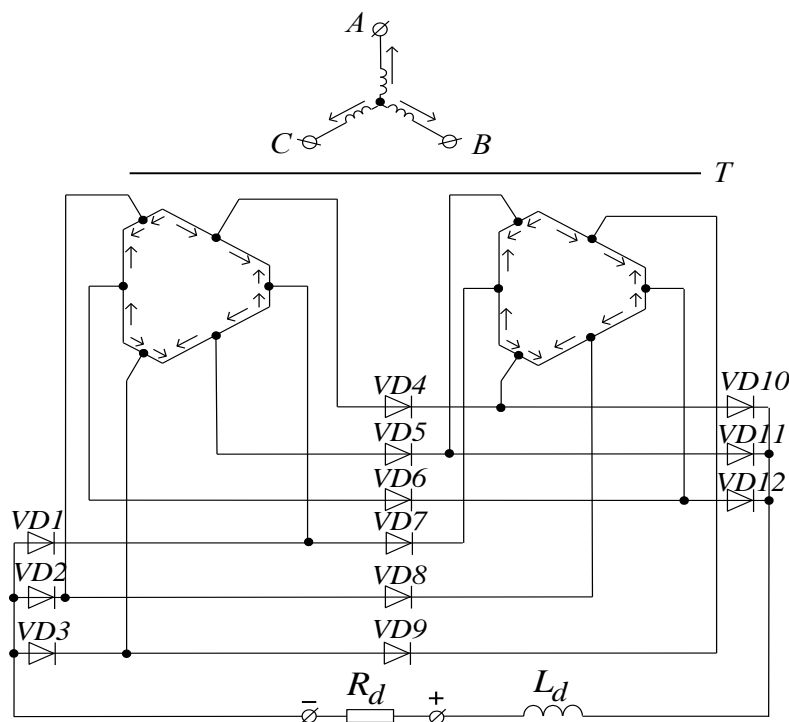


Рис.13 – Схема выпрямителя с лестничной ВС

ным построением ВО на одном трансформаторе (на рис.13 представлен вариант с полуправильными шестиугольниками). Полученные результаты для замкнутого построения ВО приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Параметры схемы

Анодный ток вентилля	Эффективный ток вентилля	Обратное напряжение	$U_2/U_d$		$I_2/I_d$		$S_2/P_d$	$S_1/P_d$	$S_T/P_d$	Вынужденное намагничивание	Пульсность	Число вентиллей в цепи тока
			0,138	0,051	0,486	0,486						
0,333	0,167	0,578	0,41	0,524	1,047	1,247	1,011	1,128	нет	12	3	

Такое построение, как показали исследования, исключает возникновение потока вынужденного намагничивания. Дополнительные расчеты о возможности модернизации тяговых трансформаторов ВА ж.-д. транспорта подтвердили наибольшую приспособленность к реконструкции именно при таком исполнении ВО. При мостовом и кольцевом выполнении схемы при формировании смежных пульсаций сопротивления цепей протекания тока нагрузки отличаются (рис.14, а). На рис.14,б показаны две позиции соединения систем ЭДС лестничной ВС, в которых формируются четыре вектора, причем сопротивления цепей протекания тока нагрузки при формировании всех векторов одинаковы. В работе выполнен расчет реконструкции выпрямителя на основе двух трансформаторов ТМРУ-16000/10, что реально выполнимо благодаря синфазности вторичных систем ЭДС. Переоборудование ВО в данном варианте не представляет особых трудностей, так как с части катушек ВО снимается по одному витку.

Преобразователь предлагается для усиления действующих систем электро-



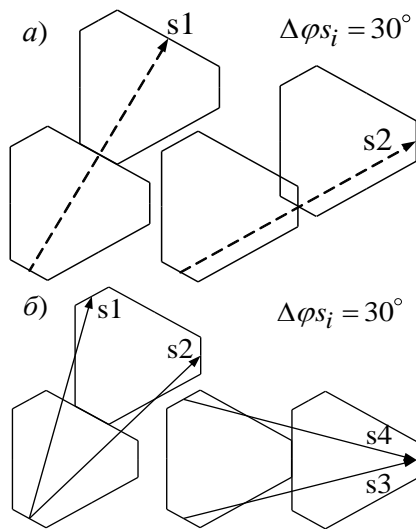


Рис. 14 – Векторные диаграммы при мостовом (а) и лестничном исполнении (б)

создание устройства возможно на основе существующего 4-зонного выпрямителя, собранного по мостовой схеме, путем несложной переделки секций ВО его трансформатора; при этом требуется меньше управляемых вентилях; упрощен алгоритм управления; схема симметрична и не требует двойной коммутации.

**В четвертой главе** проведено исследование выбранных схемных решений с помощью компьютерного моделирования (MicroCap, MATLAB Simulink) и физических моделей. В программу экспериментов по 12-пульсным выпрямителям с кольцевой и мостовой ВС входило: измерение параметров сетевого напряжения, сетевых и вентиляльных обмоток, выпрямленного напряжения в режиме ХХ, в номинальных и перегрузочных режимах, а также измерение обратных напряжений и токов вентилях и снятие ВХ. Результаты представлены в виде осциллограмм и графиков (табл.3). Сравнение результатов экспериментов на физических моделях 12-пульсных выпрямителей с мостовой и кольцевой ВС подтвердило идентичность ВХ и режимов работы ВО обоих выпрямителей в номинальных и перегрузочных режимах. Эксперимент выявил одинаковость хода внешних характеристик, как в линейной ее части, так и в области перегрузок, вплоть до перегрузки  $6I_{\text{ном}}$ .

Подтверждено различие режимов работы вентилях кольцевой группы в кольцевом выпрямителе и вентилях смежных анодно-катодных групп – в мостовом выпрямителе. Экспериментально подтверждено уменьшение средней продолжительности времени работы вентилях кольцевой группы, что обуславливает снижение мощности потерь в вентилях схемы на 25%.

снабжения 3,3 кВ посредством повышения пульсности выпрямленного напряжения и его величины в продольной ЛЭП 13,2 кВ с последующим понижением до рабочих величин напряжений в контактной сети с помощью пункта повышенного напряжения (ППН-12).

**Исследование четырехзонного выпрямителя.** В настоящее время на электровозах переменного тока для управления ТЭД находят применение зонные выпрямители. Количество зон определяется стремлением на всем диапазоне регулирования повысить среднее значение коэффициента мощности. Предложено применение новых лестничных трехзонного (заявка с участием автора) и четырехзонного (рис.15) выпрямителей с меньшим количеством управляемых СШ, исключая двойные контуры коммутации и упрощающих алгоритм управления. *Достоинства схе-*

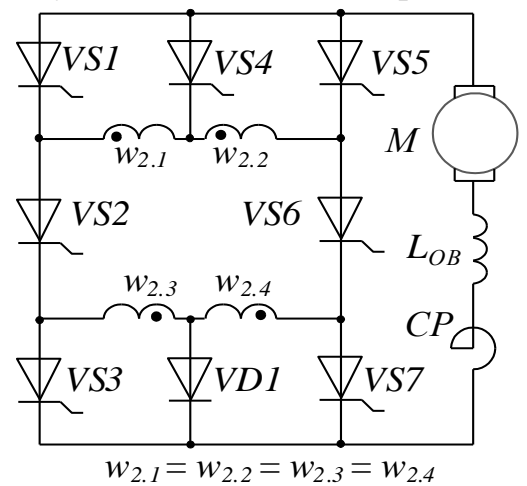
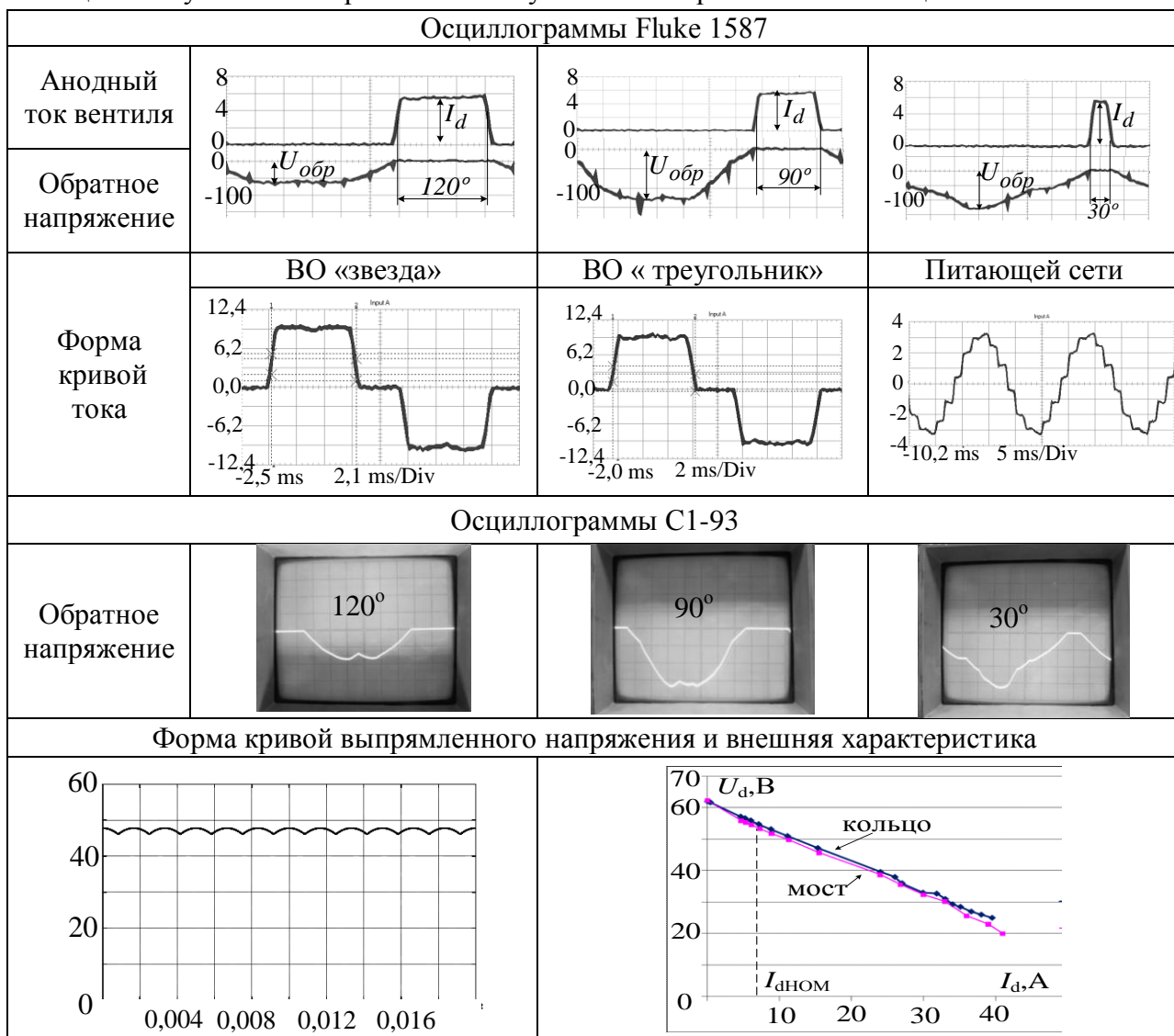


Рис. 15 – Схема 4-зонного выпрямителя

Таблица 3 – Результаты экспериментов с 12-пульсными выпрямителями с кольцевой и мостовой ВС



Подтверждено различие режимов работы вентилях кольцевой группы в кольцевом выпрямителе и вентилях смежных анодно-катодных групп – в мостовом выпрямителе. Экспериментально подтверждено уменьшение средней продолжительности времени работы вентилях кольцевой группы, что обуславливает снижение мощности потерь в вентилях схемы на 25%. В программу экспериментов по четырехзонному выпрямителю входило определение работоспособности на компьютерной модели, а также эксперименты с физической моделью в режиме ХХ, в режиме работы на активную и активно-индуктивную нагрузку. В качестве активно-индуктивной нагрузки использовался двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением (табл.4). Экспериментально доказана возможность упрощения алгоритмов управления тиристорами предложенного лестничного преобразователя, рекомендуемого для модернизации четырехзонного мостового (на электровозах ВЛ65, ВЛ80Р, ВЛ85, ЭП1) и трехзонного мостового (Sr1, ВЛ84) выпрямителей. Он имеет меньшее количество управляемых вентилях плеч по сравнению с известной мостовой схемой, что приводит к упрощению схемы управления, удешевлению и повышению надежности преобразователя.

Таблица 4 – Результаты экспериментов по четырехзонному выпрямителю

№	Зоны				I <sub>d</sub> , А	U <sub>d</sub> , В	Форма U <sub>d</sub>	Форма I <sub>d</sub>
	1	2	3	4				
1	•				0,1	1,5		
2	•				0,3	3,7		
3	•				0,5	8,9		
4		•			0,7	14,2		
5		•			0,9	21		
6		•			1,05	35,5		
7			•		1,1	42,0		
9			•		1,15	45,5		
12			•		1,2	53,5		
13				•	1,25	62,5		
15				•	1,3	73,2		
16				•	1,43	77,2		

В заключении сформулированы следующие выводы по работе: 1. Выполнен анализ выпрямителей с кольцевым и лестничным построением ВС, в ходе которого выбраны схемные решения, рекомендуемые для использования в системах электроснабжения электрического транспорта.

2. Проведена систематизация неформализованных и частично формализованных методов структурного синтеза. Определены достоинства и

недостатки представленных методов и усовершенствованы процедуры метода схемотехнических перемещений.

3. Разработан метод построения двухсекционного ТПЧФ с несимметричными напряжениями выпрямительных секций, упрощающий структуру ВО трансформаторов с  $6(n+3)$ -пульсным выпрямленным напряжением.

4. Разработана методика определения углов проводимости вентилей в кольцевой ВС, позволяющая производить выбор и правильное соединение вентилей с фазами ТПЧФ.

5. Выполнен детальный анализ электромагнитных процессов в 12-пульсном выпрямителе с кольцевой ВС. Показана идентичность электромагнитных процессов и основных расчетных соотношений в выпрямителях с кольцевыми и мостовыми ВС, дающая возможность замены на ТП электрического транспорта мостовых ВС на кольцевые. Это позволяет снизить расход электроэнергии до 6 млн. кВт·ч на сто выпрямителей в год при коэффициенте загрузки 0,25 за счет уменьшения мощности потерь в вентильных плечах.

6. Проведен анализ электромагнитных процессов в выпрямителях с лестничными ВС, результаты которого показывают возможность использования их на тяговых подстанциях грузонапряженных участков железных дорог для повышения и стабилизации уровня напряжения в контактной сети, а также на электроподвижном составе переменного тока, с возможностью повышения коэффициента мощности и упрощения силовой схемы управления электровозом.

7. Разработаны и созданы математические и физические модели, позволившие подтвердить достоверность результатов теоретических исследований электромагнитных процессов в выпрямителях с кольцевыми и лестничными ВС.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Евдокимов С.А., Щуров Н.И., Волкова О.Л. и др. Повышение энергоэффективности трехфазных преобразователей напряжения с помощью метода Штейнера // Электротехника. 2011. № 6. С. 3 – 9.

2. Евдокимов С.А., Щуров Н.И., Волкова О.Л. и др. Перспективы применения кольцевых схем выпрямления на тяговых подстанциях электрического транспорта // Транспорт: наука, техника, управление». Научный информационный сборник. М.: Изд-во ВИНТИ РАН. 2010. № 8. С. 3 – 7.
3. Волкова О.Л. , Евдокимов С.А. Синтез m-фазных преобразователей на основе двух «квазисекторных» систем напряжений // Научный вестник НГТУ. 2010. № 4(41). С. 113 – 120.
4. Аслан-заде А.Г., Евдокимов С.А., Волкова О.Л. 3N-фазные разомкнутые схемы выпрямления и их производные // Научный вестник НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. №3 (44). С. 159 – 172.
5. Евдокимов С.А., Щуров Н.И., Волкова О.Л. Зонное регулирование выходных напряжений в кольцевых и лестничных выпрямителях однофазного тока. Часть 1 // Научный вестник НГТУ. 2009. № 4(37). С. 145 – 154.
6. Евдокимов С.А., Щуров Н.И., Волкова О.Л. Зонное регулирование выходных напряжений в кольцевых и лестничных выпрямителях однофазного тока. Часть 2 // Научный вестник НГТУ. 2010. № 1(38). С. 119 – 127.
7. Евдокимов С.А., Сопов В.И., Волкова О.Л. и др. Ротационные регулируемые выпрямители // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2010. № 2. С. 361 – 364.
8. Евдокимов С.А., Щуров Н.И., Волкова О.Л. и др. Кольцевые схемы выпрямления для 12n-фазного преобразователя // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2010. № 1. С. 329 – 333.
9. Евдокимов С.А., Волкова О.Л. Лестничные и кольцевые вентильные схемы для преобразователей повышенной мощности // Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: в 7 т. Т. 7. Новосибирск: НГТУ, 2010. С. 51 – 58.
10. Волкова, О.Л. Методы синтеза структур выпрямителя // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. №2 (64). С. 117 – 122.
11. Преобразователь однофазного тока в постоянный: пат. Рос. Федерация. RU № 2400007 С1, МПК: H02M 7/155 / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, О.Л. Лагутина // заявл. 22.07.09; опубл. 20.09.2010, Бюл. № 26. 7 с.
12. Преобразователь переменного тока в постоянный с 18-кратной частотой пульсации: пат. Рос. Федерация. RU № 2414044 С1, МПК: H02M 7/162 / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, О.Л. Волкова, А.А. Степанов, В.И. Сопов // заявл. 02.02.10; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7. 10 с.

Отпечатано в типографии Новосибирского государственного технического университета 630092, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
тел./факс (383) 346 - 08 - 57  
формат 60x84/16, объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.,  
заказ № 1715 , подписано в печать «11»11.2011 г.