

На правах рукописи



**Степанов Александр Андреевич**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ МНОГОФАЗНЫХ  
ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2020

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

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

**Официальные оппоненты:** **Пантелеев Василий Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Сибирский федеральный  
университет», г. Красноярск, кафедра  
«Электротехнические комплексы и системы»,  
заведующий;

**Комякова Татьяна Владимировна**  
кандидат технических наук, доцент,  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Омский государственный  
университет путей сообщения», г. Омск,  
кафедра «Электроснабжение железнодорожного  
транспорта», доцент

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Уфимский государственный  
авиационный технический университет», г. Уфа

Защита состоится «09» апреля 2020 года в 10<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», 630073, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте [www.nstu.ru](http://www.nstu.ru)

Автореферат разослан «\_\_» февраля 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук



Максим Александрович Дыбко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертационного исследования.** В соответствии с «Энергетической стратегией России на период до 2030 года» задача повышения эффективности потребления электрической энергии в энергоемких отраслях экономики является первостепенной. К ряду энергоемких отраслей экономики относится электрический транспорт оснащенный тяговым электроснабжением переменного и постоянного тока. Существующие системы тяги постоянного тока не в полной мере отвечают современным требованиям увеличения транспортных потоков и нарастания объемов перевозок. Так как они приводят к возрастанию нагрузки в тяговых сетях и соответственно увеличению рабочих токов до максимальных значений при заданном напряжении на шинах тяговых подстанций (ТП). Такое положение вызывает дальнейшее повышение мощности потребляемой электроподвижным составом (ЭПС) и приводит к снижению напряжения в системе «ЭПС – тяговая сеть – ТП». Уменьшение выпрямленного напряжения на выходе ТП, вызванное возрастанием тока нагрузки до максимальных значений, ведет к снижению мощности на ЭПС и, соответственно, падению скорости его движения, что ограничивает пропускную способность систем тягового электроснабжения. В силу указанных обстоятельств возникают требования к трансформаторно-выпрямительным агрегатам (ТВА) ТП по повышению стабилизационных свойств выпрямленного напряжения и снижению потерь электроэнергии. Для решения указанной проблемы применяют ряд способов, которые для стабилизации выпрямленного напряжения используют дополнительное оборудование, что приводит к возрастанию стоимости и энергопотреблению ТВА.

Одним из рациональных путей стабилизации выпрямленного напряжения и снижения потерь электроэнергии на ТВА является применение многофазных выпрямителей (МВ). Они выполнены на основе трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ) и не требуют дополнительного оборудования и связанного с этим увеличения энергопотребления, при этом потери электроэнергии снижаются за счет уменьшения искажающего влияния на питающую сеть.

Диссертационное исследование выполнено на основе результатов работ ученых и исследователей, которые занимались вопросами анализа и исследования вопросов повышения энергоэффективности работы ТП тягового электроснабжения постоянного тока, проблемами повышения энергетических показателей ТВА и путей их решения, среди которых значительный вклад внесен Бурковым А.Т., Марикиным А.Н., Бадером М.П., Гапановичем В.А., Аржанниковым Б.А., Шалимовым М.Г., Шляпошниковым Б.М., Репиным А.М., Барковским Б.С., Ворфоломеевым Г.Н., Щуровым Н.И., Евдокимовым С.А., Зиновьевым Г.С., Игольниковым Ю.С., Аслан-Заде А.Г., Соповым В.И. и др.

Известные работы посвящены решению проблем стабилизации выпрямленного напряжения ТВА но при этом недостаточное внимание уделено вопросу снижения ими энергопотребления. Таким образом, развитие и

совершенствование многофазных ТВА, повышающих энергоэффективность ТП, является актуальной задачей в условиях увеличения транспортных потоков и нарастания объемов перевозок.

**Цель диссертационной работы** – повышение энергоэффективности тяговых подстанций постоянного тока, которая достигается применением новых технических решений многофазных трансформаторно-выпрямительных агрегатов, снижающих потери электроэнергии и стабилизирующих напряжение в тяговой сети.

В соответствии с целью в диссертации сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. Анализ технико-энергетических показателей существующих многофазных ТВА и определение перспективных тенденций схмотехнических решений, обеспечивающих повышение энергоэффективности ТП.

2. Обоснование и разработка схмотехнических решений многофазных ТВА, повышающих энергоэффективность ТП.

3. Разработка методики определения углов проводимости вентиляей для комбинированных многопульсовых ТВА.

4. Проведение модельных и экспериментальных исследований предлагаемых многофазных ТВА для подтверждения достоверности теоретических исследований и определения их энергетической эффективности.

5. Предложение по реконструкции и модернизации существующих многофазных ТВА, повышающих энергоэффективность ТП.

**Объект исследования:** тяговые подстанции постоянного тока, представляющие собой совокупность устройств управления, распределения, вентильных выпрямителей, тяговых трансформаторов и вспомогательных устройств.

**Предмет исследования:** повышение энергетических характеристик ТВА, обуславливающих энергоэффективную работу ТП постоянного тока.

**Методы исследования.** При решении поставленных в диссертации задач принят комплексный подход, включающий в себя анализ и обобщение данных научно-технической литературы с применением теоретических и экспериментальных методов исследований. В основу теоретических исследований положены методы структурного синтеза, векторных диаграмм, гармонического анализа, агрегирования, кусочно-линейного припасовывания и численного интегрирования. Работа основана на фундаментальных законах и положениях теоретических основ электротехники и электродинамики. При расчете и анализе математических зависимостей использовался программный пакет «MathCAD». Экспериментальные исследования проводились на имитационных моделях в среде MATLAB/Simulink, а также на физических моделях.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Новые схмотехнические решения многофазных модульных ТВА, позволяющие снизить потери электроэнергии и повысить стабильность выпрямленного напряжения на шинах ТП постоянного тока.

2. Методика, устанавливающая взаимосвязь фазовых структур вентильных обмоток (ВО), вентиляей в многопульсовых ТВА с кольцевыми вентильными

структурами и параллельным соединением выпрямительных секций, определяющая их углы проводимости.

3. Имитационные модели разработанных ТВА, позволяющие определить энергоэффективность ТП в эксплуатационных режимах работы.

4. Аналитические выражения для расчёта токовых нагрузок вентилях модульных многофазных ТВА.

**Достоверность полученных результатов.** Определяется обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследовании математических и имитационных моделей. Подтверждается сходимостью результатов при сопоставлении теоретических расчетов и цифрового моделирования в среде MATLAB/Simulink с результатами исследований физических моделей.

#### **Научная новизна работы:**

В диссертационной работе решены теоретические задачи развития концепции построения многофазных ТВА на основе идентичных ТПЧФ с неуправляемыми выпрямителями ТП постоянного тока:

1. Разработаны новые модульные построения кольцевых 24-х пульсовых ТВА, обеспечивающие повышение энергетической эффективности ТП. Новизна полученных технических решений защищена 4-мя патентами РФ.

2. Предложена и обоснована методика определения углов проводимости вентилях многопульсовых ТВА с параллельным соединением выпрямительных секций и кольцевыми вентилями структурами.

3. Рассчитаны энергетические характеристики, позволяющие оценить энергетическую эффективность предлагаемых модульных и действующих многофазных ТВА ТП.

4. Получены расчетные соотношения, определяющие энергетические потери в вентилях новых модульных многофазных ТВА.

#### **Практическая ценность результатов работы:**

1. Предложены энергоэффективные модульные 24-х пульсовые схмотехнические решения ТВА ТП, оригинальность которых защищена 4-мя патентами РФ.

2. Даны практические рекомендации по реконструкции и модернизации ТВА на базе трансформаторов УТМРУ-6300/35 в модульное 24-х пульсовое решение параллельного типа, обеспечивающее повышение энергетического КПД ( $\eta_{\Sigma}$ ) ТП на 1,1% в сравнении с известным 24-х пульсовым выпрямителем, находящегося в эксплуатации.

#### **Реализация результатов работы:**

1. Реализация подтверждена актом использования результатов научных исследований и разработок диссертации в производственной деятельности по модернизации ТВА ТП на Новосибирской дистанции электроснабжения ОАО «Российские железные дороги».

2. Материалы диссертации, касающиеся анализа и расчета электромагнитных процессов в многопульсовых модульных ТВА, описания математических моделей, а также результатов компьютерного и физического

моделирования внедрены в учебный процесс кафедры «Электротехнические комплексы» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

**Личный вклад автора** в результаты работ, опубликованных в соавторстве. Постановка и решение задачи рационального построения ТВА с минимизацией потерь электроэнергии и установленной мощности, составление аналитических соотношений, разработка расчетных и математических моделей являющиеся продолжением развития теории преобразования числа фаз на трансформаторной технике. Автор принимал непосредственное участие в разработке, постановке и проведении экспериментальных исследований, им выполнен анализ и обобщение полученных данных, сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований, имитационного моделирования, все численные расчеты и их интерпретация, аналитические выводы. Подготовка и написание патентов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на:

Научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (29 – ноября, 2 – декабря 2012 г.), г. Новосибирск;

X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (2–4 октября 2010 г.), г. Новосибирск;

II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Инновационная энергетика 2010» (10–12 ноября 2010 г.), г. Новосибирск;

XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (2–4 октября 2012 г.), г. Новосибирск;

Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука технологии инновации» (2–4 октября 2013 г.), г. Новосибирск;

XIX всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (4-6 декабря 2013 г.), г. Томск;

II Всероссийской конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования», 2016, г. Новосибирск;

XXI Международной научно-практической конференции «EurasiaScience» (15 мая 2019 г.), г. Москва;

XXII Международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире» (31 мая 2019 г.), г. Москва.

#### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликованы 27 печатных работ, 7 из которых – в рецензируемых научных журналах, рекомендованных списком ВАК, 3 – в изданиях индексируемых в наукометрических базах Scopus и/или Web of Science, 9 – в материалах и трудах всероссийских и международных научных конференций, 8 – патентов РФ.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и 2-х приложений. Работа изложена на 168 страницах машинописного текста, включает 68 рисунков и 17 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** отражена актуальность темы исследования диссертационной работы, отмечено современное состояние проблемы и определено направление данного исследования. Обоснована необходимость поиска новых подходов к построению схемных решений ТВА ТП. Сформулированы цель, задачи работы и пути их решения, научная новизна, описаны методы исследований и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены краткие теоретические сведения и принципы работы ТВА ТП. Проведен анализ технико энергетических показателей схемотехнических решений ТВА, применяемых на ТП железнодорожного (ЖД), городского электрического транспорта (ГЭТ) и метрополитена, выявлены их достоинства, недостатки. Установлена связь снижения напряжения в тяговой сети при возрастании в ней тока нагрузки до максимальных значений с уменьшением выпрямленного напряжения на выходе ТВА.

Показано, что известные устройства, стабилизирующие выпрямленное напряжение, требуют применения на ТВА дополнительного оборудования, громоздких дорогих фильтрующих, сглаживающих элементов, приводящих к увеличению энергопотребления и стоимости ТП.

Одним из эффективных путей стабилизации выпрямленного напряжения и снижения потерь электроэнергии на ТП является реализация многофазного режима для ТВА, это не требует дополнительного оборудования и не вызывает увеличения потребления электроэнергии. Однако построение преобразователей с 30, 36, 42 и 48 кратной частотой выпрямленного напряжения влечёт увеличение количества вентилях, усложняет технологию изготовления вентиляных обмоток (ВО), что не позволяет рекомендовать их для практического применения. Проведен анализ полных мощностей первичных и вторичных обмоток многопульсовых трансформаторных преобразователей числа фаз (ТПЧФ) в качестве ТВА, который путем решения задачи Штейнера показал преимущество трехфазной системы напряжений над любой другой, при этом высокий показатель использования трансформаторного оборудования для 12-ти и 24-х пульсовых схем выпрямления.

Анализ перспективных схемотехнических решений определил направления для поиска и разработки новых 24-х пульсовых энергоэффективных ТВА:

- использование двухкаскадных построений ТПЧФ;
- соблюдение условий идентичности при формировании трансформаторно-выпрямительных секций (ТВС);
- применение модульного принципа при разработке ТВА;
- построение вентиляных конструкций на основе кольцевых схем;
- отказ от использования уравнивательных реакторов (УР).

Предложены новые кольцевые 24-х пульсовые ТВА модульного типа, отвечающие установленным требованиям обеспечивающие стабилизацию выпрямленного напряжения на шинах ТП и снижение потребления электроэнергии, оригинальность которых подтверждена патентами РФ № 144525 и № 175986.

Во второй главе проведен анализ электромагнитных процессов в предложенных новых кольцевых 24-х импульсных ТВА, основанных на последовательном и параллельном соединении двух идентичных трансформаторно-выпрямительных модулей (ТВМ) половинной мощности. На рисунке 1 представлена электрическая схема 24-х импульсного ТВА с параллельной работой указанных ТВМ без УР.

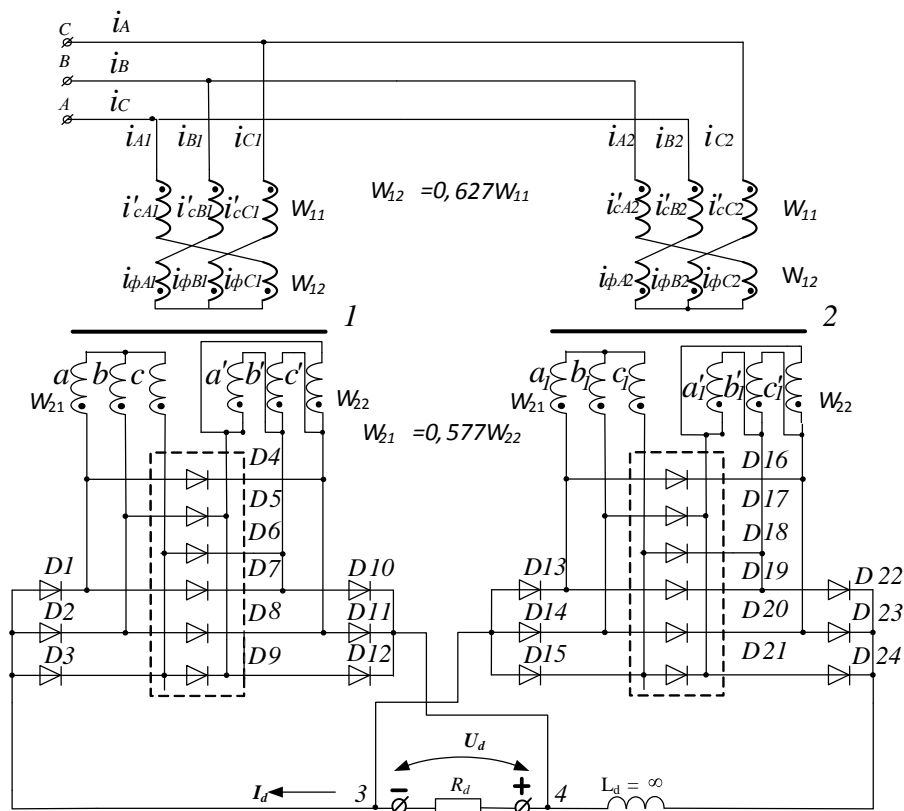


Рисунок 1 – Схема 24-х импульсного кольцевого модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ

Идентичность ТВМ основана на одинаковых первичных, вторичных обмотках, преобразовательных трансформаторов (с равными коэффициентами трансформации и напряжением короткого замыкания) и кольцевых вентильных схем. Показано, что равенство реактивных сопротивлений обоих ТВМ позволяет при параллельной работе получить равенство токов в нагрузке и отказаться от использования УР. Вторичные обмотки обоих ТВМ имеют по два значения витковых чисел, они соединены между собой в «звезду», «треугольник» и образуют шестифазные симметричные системы ЭДС которые, со своими шестифазными кольцевыми схемами, формируют два 12-ти импульсных выпрямленных напряжения. Фазовый сдвиг создаваемый первичными обмотками обоих ТВМ (относительно сети первого на угол  $+7^{\circ}30'$ , а второго на угол  $-7^{\circ}30'$ ) формирует на выходе ТВА 24-х импульсное выпрямленное напряжение. Заложенные в схемотехническом решении принципы идентичности и модульности построения ТВМ обеспечивают их самостоятельную работу в случае отказа или отключения одного из них. При этом они формируют 12-ти импульсное выпрямленное напряжение половинной мощности.



Анализ комбинированных многопульсовых ТВА проводимый методом векторных вращающихся диаграмм (МВВД) позволяет определить порядок работы ВО, вентилях и последовательность цепей протекания тока нагрузки но не дает значений  $\lambda$  – углов проводимости вентилях (УПВ). Поскольку использование известного графоаналитического метода (ГАМ) затруднено в силу «анизотропии углов проводимости» вентилях и не дает полной и развернутой картины их формирования, в данной работе разработана фазо-аналитическая методика (ФАМ). Она наглядно и убедительно выявляет «анизотропию» УПВ и обеспечивает рациональный подбор схемных решений и силовых электронных приборов. В методике используется «аппроксимация узловых точек» (УТ) схемных решений в «потенциальные кольца» (ПК), что позволяет элементы схем, расположенные до УТ разместить внутри ПК, а элементы находящиеся после УТ расположить снаружи ПК. Разместив ПК на фазовой плоскости (ФП) с привязкой к ним точек соединения ВО, векторов напряжений и вентилях в соответствии с их фазовыми углами, получаем вентиляно-фазовый портрет (ВФП). На рисунке 2 приведен пример ВФП выпрямителя Ларионова (рисунок 2, а).

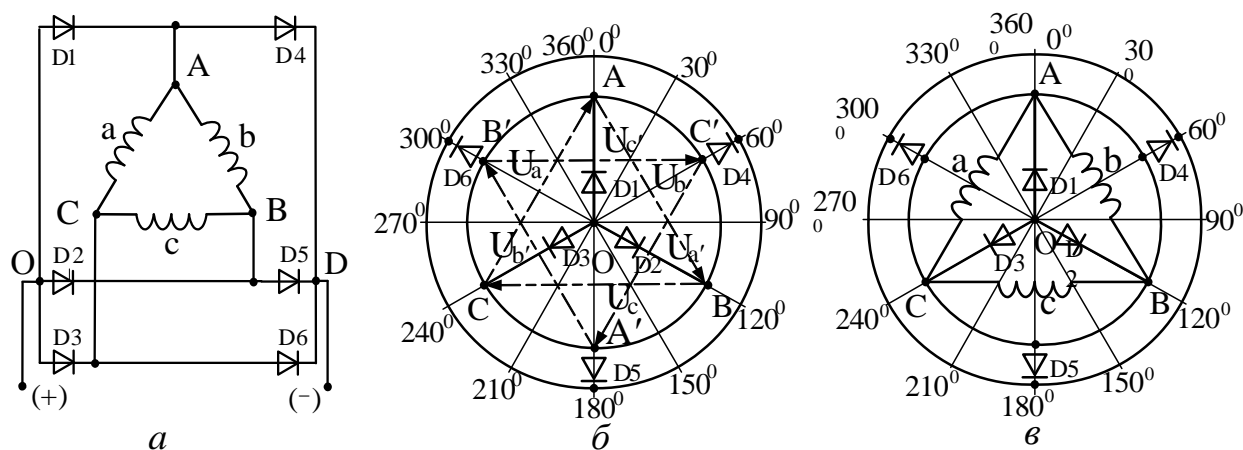


Рисунок 2 – Трехфазная схема выпрямления Ларионова: а – электрическая схема; б – ВФП с векторами напряжений; в – ВФП с ВО

Она с помощью ФАМ трансформируется в ВФП (рисунок 2, в), для этого точка О (рисунок 2, б) размещена в центре ФП, используя первое ПК для точек соединения векторов напряжений ВО (А, В, С), катодов вентилях D1, D2, D3 и анодов вентилях D4, D5, D6, а второе ПК для точек соединения катодов вентилях D4, D5, D6. Для наглядности прямые и обратные векторы напряжений на рисунке 2, б заменены на ВО (рисунок 2, в). Анализ полученного ВФП наглядно показывает, что у всех вентилях углы проводимости составляют  $120^{\circ}$ эл. град.

Анализ ВФП выпрямителя 12-ти импульсного с кольцевой вентиляно-фазовой схемой (рисунок 3) доказывает невозможность инвариантного чередования фаз ВО, как в мостовых схемах, наглядно объясняя это закреплением особого включения между первым и вторым ПК вентилях (D7, D4, D8, D5, D9, D6), которые образуют кольцо. Результаты анализа УПВ обобщены в таблице (рисунок 3, б).

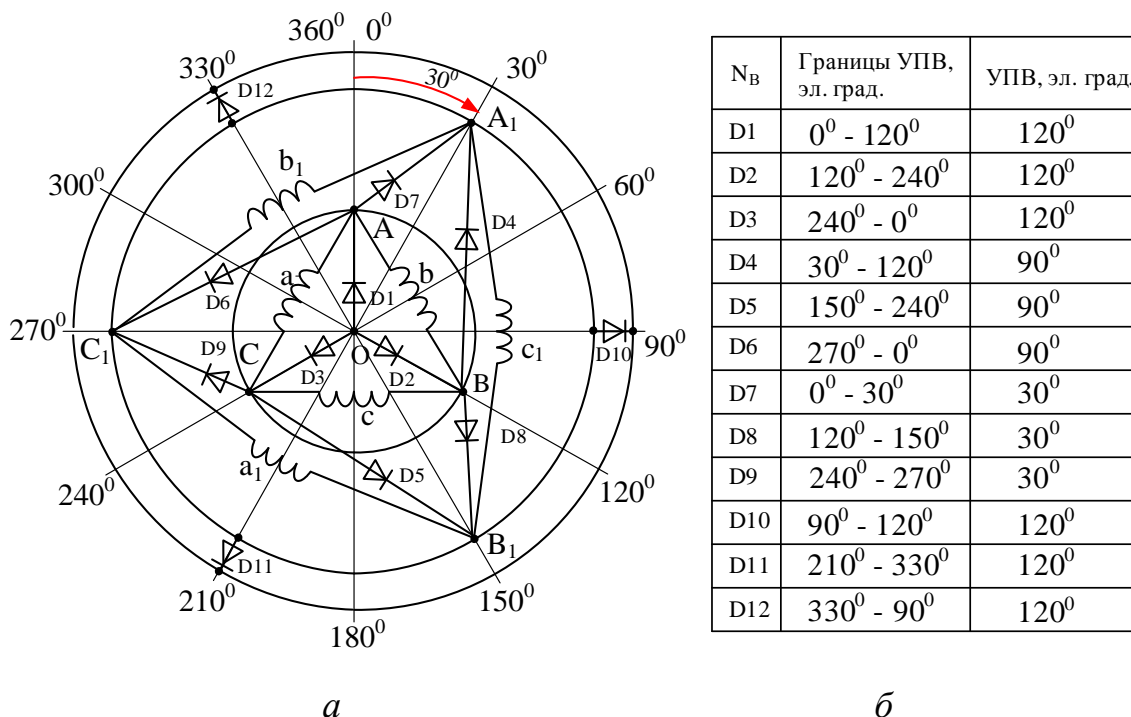


Рисунок 3 – Кольцевой 12-ти пульсовой схема выпрямления: *a* – ВФП; *б* – таблица УПВ выпрямителя

Особенностью предложенного ТВА является параллельная работа ТВС, в местах их соединений (точка О и внешнее ПК) которая осуществляется в моменты совпадения УПВ обоих схемных решений.

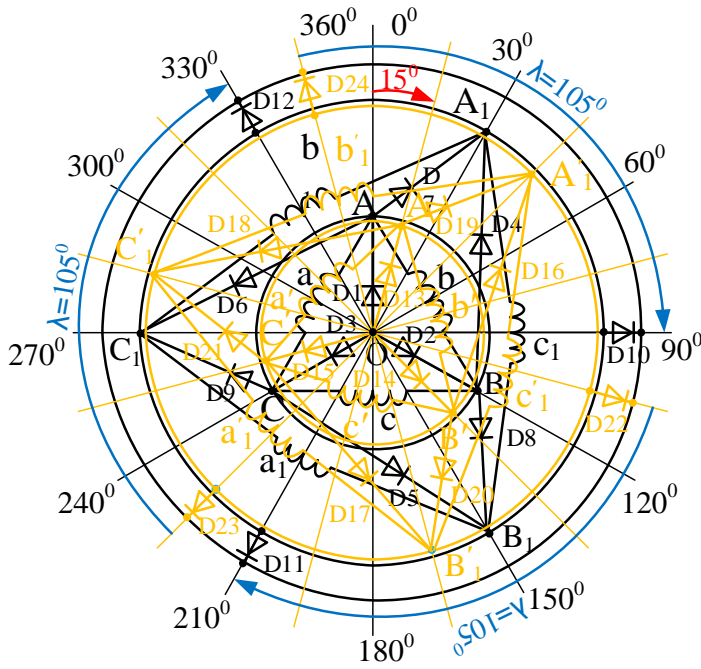
Анализ ВФП (рисунок 4, *a*) показывает, что сокращение УПВ на 15° эл. град. связано с фазовым сдвигом между ТВС, результаты приведены в таблице (рисунок 4, *б*).

На основании проведенного анализа ВФП схемных решений установлено, что изложенный принцип, составляющий основу разработанной ФАМ по определению УПВ трехфазных выпрямительных схмотехнических решений, представляет:

1. ФАМ позволяет наглядно и убедительно установить взаимосвязь фазовых структур ВО и вентилях, формирующих УПВ с конкретизацией углового диапазона каждого вентиля;

2. Возможность значительного упрощения процесса определения цепи протекания тока, что доказывается наглядным определением принципа формирования УПВ на примере кольцевых вентилях структур;

3. Установлена особенность образования УПВ при параллельном соединении выпрямительных секций, свидетельствующая о сокращении УПВ. на величину фазового сдвига (6-ти пульсовых – 60°, 12-ти пульсовых – 30°, 24-х пульсовых – 15°).



N <sub>B</sub>	Границы УПВ, эл. град.	УПВ, эл. град.	N <sub>B</sub>	Границы УПВ, эл. град.	УПВ, эл. град.
D1	60° - 165°	105°	D13	15° - 120°	105°
D2	300° - 45°	105°	D14	255° - 360°	105°
D3	180° - 285°	105°	D15	135° - 240°	105°
D4	240° - 315°	75°	D16	195° - 210°	15°
D5	120° - 195°	75°	D17	75° - 90°	15°
D6	0° - 75°	75°	D18	315° - 330°	15°
D7	330° - 345°	15°	D19	225° - 300°	75°
D8	210° - 225°	15°	D20	105° - 180°	75°
D9	30° - 105°	15°	D21	345° - 60°	75°
D10	150° - 255°	105°	D22	45° - 150°	105°
D11	30° - 135°	105°	D23	285° - 30°	105°
D12	270° - 15°	105°	D24	165° - 270°	105°

*a*

*б*

Рисунок 4 – Модульный 24-х пульсовый кольцевой выпрямитель с параллельным соединением ТВС: *a* – ВФП; *б* – таблица УПВ выпрямителя

На основе полученных значений УПВ (рисунок 4) построена диаграмма работы вентиля 24-х пульсового модульного ТВА параллельного типа (рисунок 5), позволяющая определить токи вентиля: действующий  $I_d^{(\lambda)}$ ; средний  $I_{cp}^{(\lambda)}$  и провести расчеты потерь энергии в зависимости от  $\lambda$  каждого вентиля учитывая, что  $L \rightarrow \infty$  в цепи выпрямленного тока:

$$\Delta P_{di} = R_d \cdot \left( \frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i(t) d(t) \right)^2 + E_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i^2(t) d(t)}; \quad (1)$$

суммарные потери в вентилях для 24-х пульсового схемного решения в зависимости от их  $\lambda$  определены выражением:

$$\Delta R_{\Sigma di} = \sum_{i=1}^{24} \left[ R_d \cdot \left( \frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i(t) d(t) \right)^2 + E_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i^2(t) d(t)} \right]; \quad (2)$$

влияние суммарных потерь энергии в вентилях на КПД ( $\eta$ ) ТВА выражается следующим образом:

$$\eta = \frac{P_d}{\Delta R_{\Sigma di} + P_d}. \quad (3)$$

Проведенные вычислительные эксперименты с использованием выражений (1, 2, 3) показывают, что снижение потерь энергии в вентилях вызываемые уменьшением УПВ в предложенных ТВА, приводят к увеличению их КПД в сравнении с существующим 24-х выпрямителем в пределах 0,25 – 0,38 %

Анализ коммутационных процессов в кольцевых модульных ТВА с учетом индуктивностей трансформатора и сети, выполнен методом кусочного приспособовывания и получены функции токов и напряжений, в том числе напряжения вентиляей, коммутационного тока в режиме проводимости 3-х вентиляей.

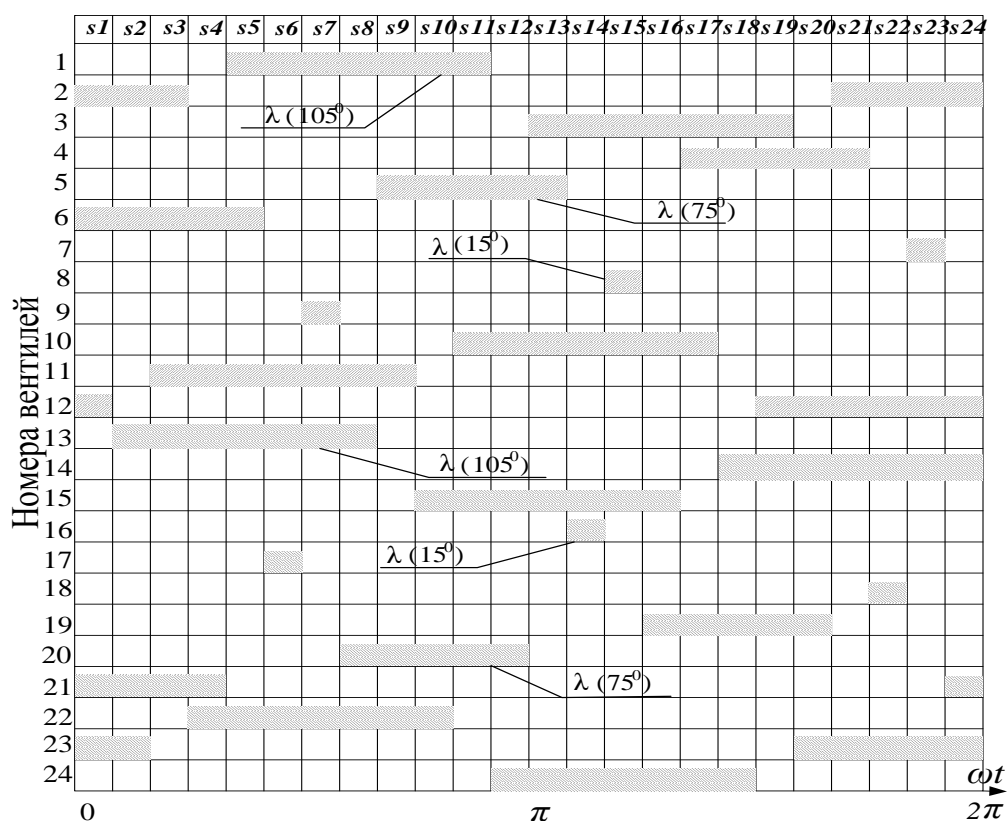


Рисунок 5 – Последовательность работы вентиляей модульного 24-х пульсового ТВА с параллельным соединением ТВМ при идеальной коммутации

Результаты сопоставлены с данными известного 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 и возможности замены мостовых ВС на кольцевые в мощных преобразователях ТП электрического транспорта.

Предложенное модульное построение многофазных ТВА на основе двух идентичных ТВС снижает массогабаритные показатели трансформаторов ( $S_T / P_d$ ) в сравнении с однотрансформаторным на 11%, а применение кольцевых ВС повышает КПД вентиляйной структуры на 25%. Техничко-энергетические параметры модульных 24-х пульсовых схмотехнических решений, (таблица 1) сопоставлены с действующим мостовыми ТВА, показывающие, что они обладают лучшими показателями. Последовательное соединение ТВМ увеличивает выпрямленное напряжение вдвое, что эффективно для ТП повышенного напряжения, а их параллельное соединение увеличивает выпрямленный ток вдвое, это позволяет повысить энергоэффективность низковольтных ТП с большими токовыми нагрузками это удовлетворяет современным требованиям нарастания объемов перевозок на электрическом транспорте.

Таблица 1 – Технические параметры 24-х пульсовых ТВА

Схемные решения 24-х пульсовых ТВА								
Параметры		Типы соединения кольцевых модулей						Мостовая послед. – паралл.
		последовательное			параллельное			
трансформаторов	$S_T / P_d$	1,086			1,086			1,129
	$K_{ИСП}$	0,92			0,92			0,88
	$I_2 / I_d$	0,47			0,235			0,235
	$U_2 / U_d$	0,272			0,584			0,584
	$I_d / I_1$	$1,576 / K_T$			$1,576 / K_T$			$1,576 / K_T$
вентильных конструкций	$\lambda$ , эл. град.	$30^0$	$90^0$	$120^0$	$15^0$	$75^0$	$105^0$	$120^0$
	$N_B$	6	6	12	6	6	12	24
	$I_{a\text{ сред}} / I_d$	0,083	0,25	0,333	0,021	0,104	0,146	0,167
	$I_a \text{ эфф} / I_d$	0,288	0,5	0,577	0,144	0,322	0,382	0,408
	$U_{обр\text{ max}} / U_d$	0,506	0,506	0,262	1,013	1,013	0,524	0,524
	$N_B$ в цепи тока	6			3			4

В третьей главе работы описаны имитационные модели модульных 24-х ТВА (рисунок 6) и исследованы особенности их работы.

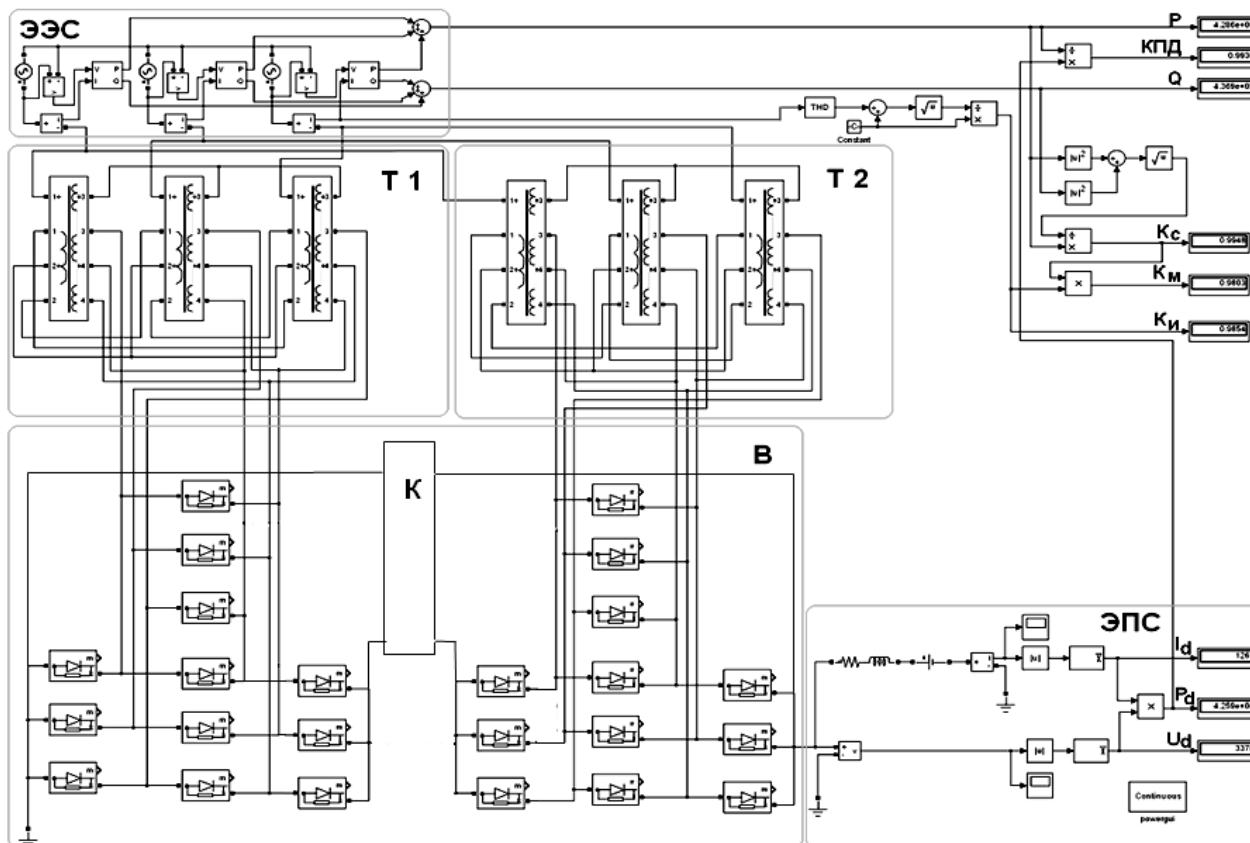


Рисунок 6 – Схема имитационной модели модульного 24-х пульсового кольцевого выпрямителя

В среде Simulink пакета MATLAB идентичные ТПЧФ на трансформаторах Т1 и Т2 нагружены на 12-ти пульсовые кольцевые выпрямительные секции, которые с помощью коммутатора (К) включаются между собой параллельно или последовательно, формируя 24-х пульсовое выпрямленное напряжение для работы ЭПС. Получены мгновенные значения напряжений и токов (рисунок 7), отражающие основные электромагнитные зависимости, а результаты продолжительности включения вентиляей подтверждают справедливость ФАМ.

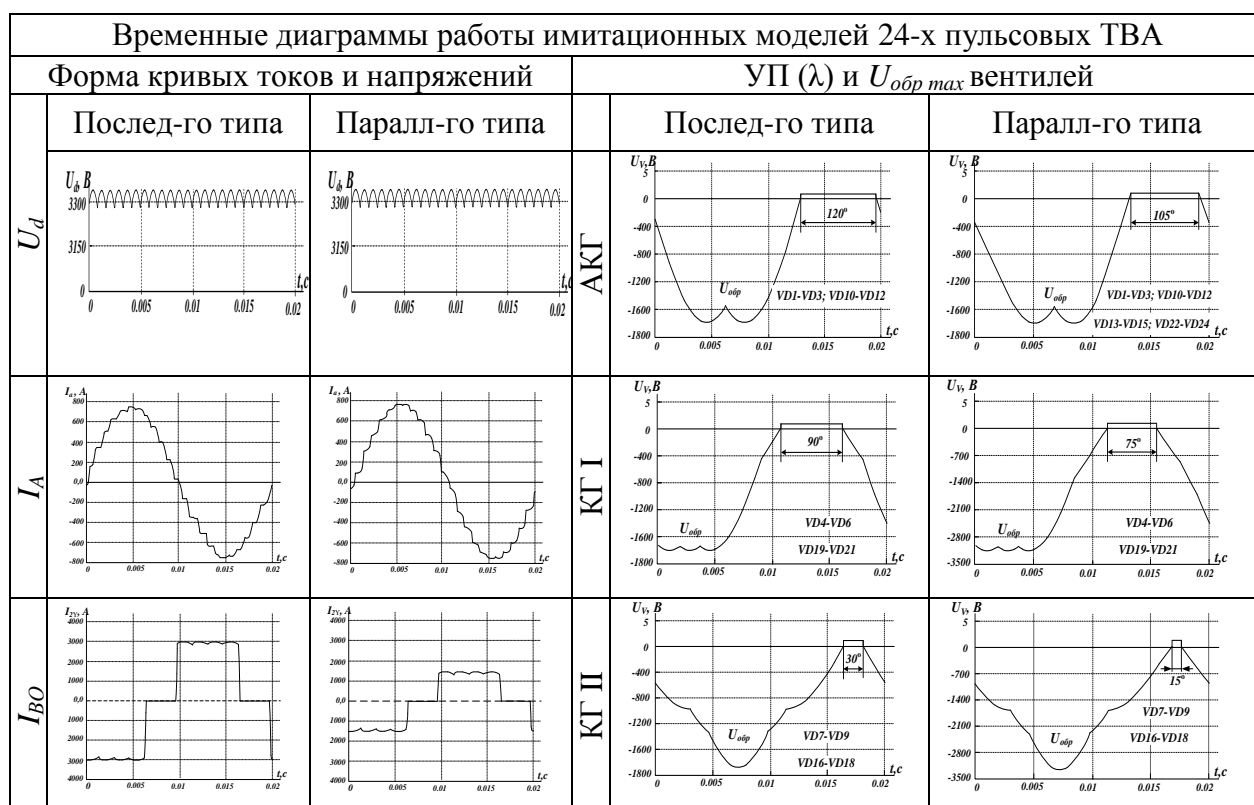


Рисунок 7 – Временные диаграммы работы компьютерных моделей

Они характеризуют переходные процессы и образуют различные углы проводимости вентиляей при последовательном и параллельном соединении выпрямительных модулей.

Проведенное численное моделирование ТВА с использованием технических характеристик трансформаторного и вентиляного оборудования, применяемого на ЖД транспорте свидетельствует, что у новых многопульсовых схемных решений с увеличением нагрузки происходит повышение энергетического КПД ( $\eta_{э}$ ), а нормированные ВХ становятся более жестче в сравнении с известными 12-ти и 24-х пульсовыми мостовыми решениями (рисунок 8).

Анализ ВХ (рисунок 8, б) показывает, что при равных значениях  $I_{дном}$  модульный 24 пульсовый ТВА параллельного типа обладает лучшей стабилизацией выпрямленного напряжения, при этом  $U_d$  превышает значение по сравнению с мостовыми ТВА 12-ти пульсовым на 4%, а 24-х пульсового на 1,1% и модульного кольцевого последовательного типа на 0,7%.

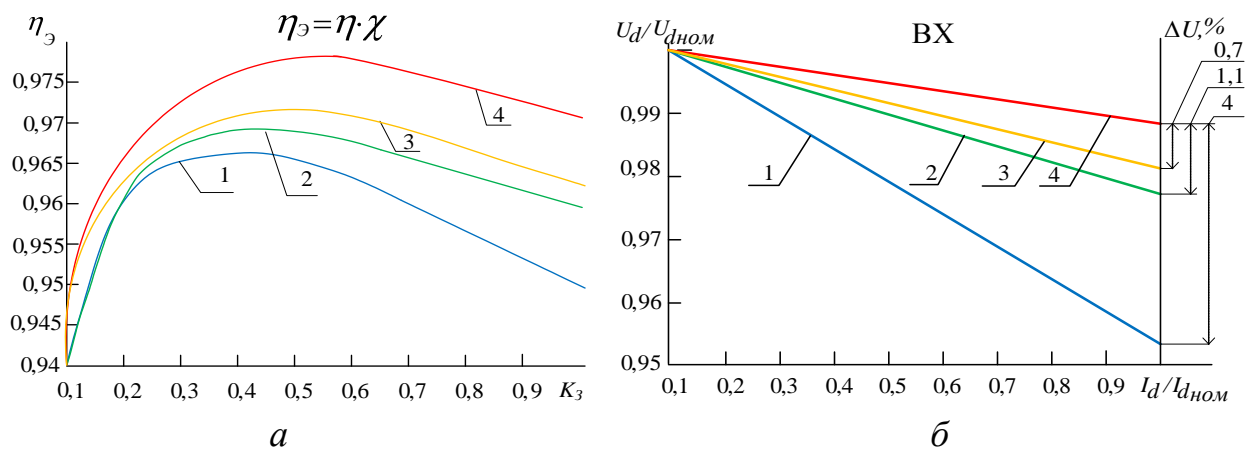


Рисунок 8 – Зависимость энергетического КПД ( $\eta_{\varepsilon}$ ) и ВХ от коэффициента нагрузки полученные на компьютерных моделях ТВА: 1 – мостовой 12-ти пульсовый; 2 – мостовой 24-х пульсовый последовательно параллельного типа; 3 – модульный кольцевой 24-х пульсовый последовательного типа; 4 – модульный кольцевой 24-х пульсовый параллельного типа

Проведенные экспериментальные исследования на физическом макете (рисунок 9) полностью подтвердили полученные теоретические положения и прогнозируемый характер работы кольцевых 24-х пульсовых модульных ТВА.



Результаты исследований физической модели представлены основными энергетическими характеристиками (рисунок 10). Доказана справедливость предложенной методики, предопределившая «необычное» поведение УПВ при использовании кольцевых вентильных структур и параллельном соединении ТВС.

Рисунок 9 – Макет физической модели

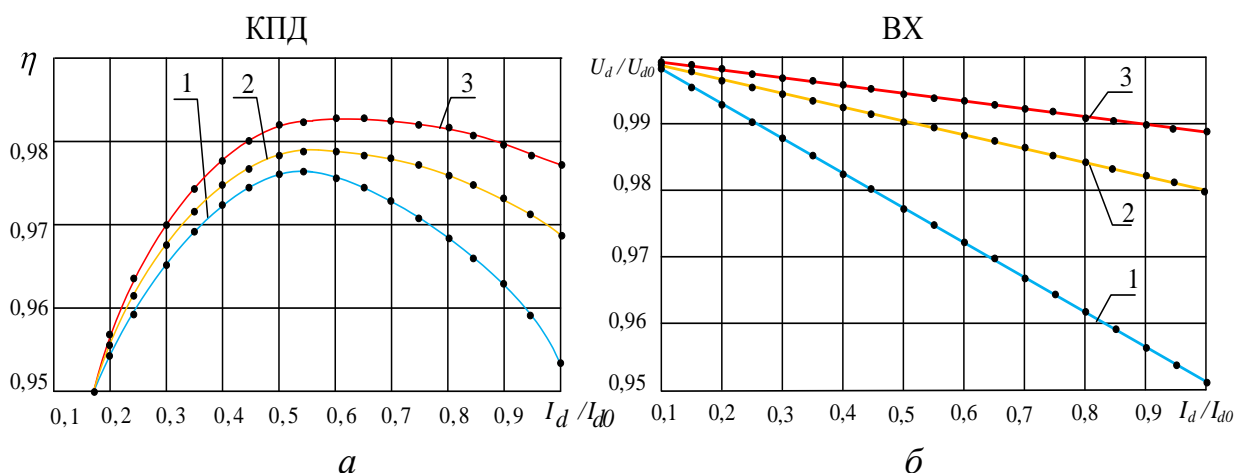


Рисунок 10 – Зависимость КПД и ВХ от коэффициента нагрузки полученные на физических моделях модульных кольцевых ТВА: 1 – 12-ти пульсового; 2 – 24-х пульсового последовательного типа; 3 – 24-х пульсового параллельного типа

Сравнительный анализ результатов экспериментов на компьютерных и физических моделях подтвердил, что модульные кольцевые 24-х пульсовые ТВА имеют более высокие значения КПД, чем мостовые в среднем на 0,4 – 1,1 %.

В четвертой главе выполнен расчет по реконструкции двух ТВА с преобразовательными трансформаторами УТМРУ-6300/35ЖУ1, по предлагаемому схмотехническому решению. Схема реконструкции вентильных обмоток одного стержня трансформатора представлена (рисунок 10, а) до реконструкции, (рисунок 10, б) после реконструкции.

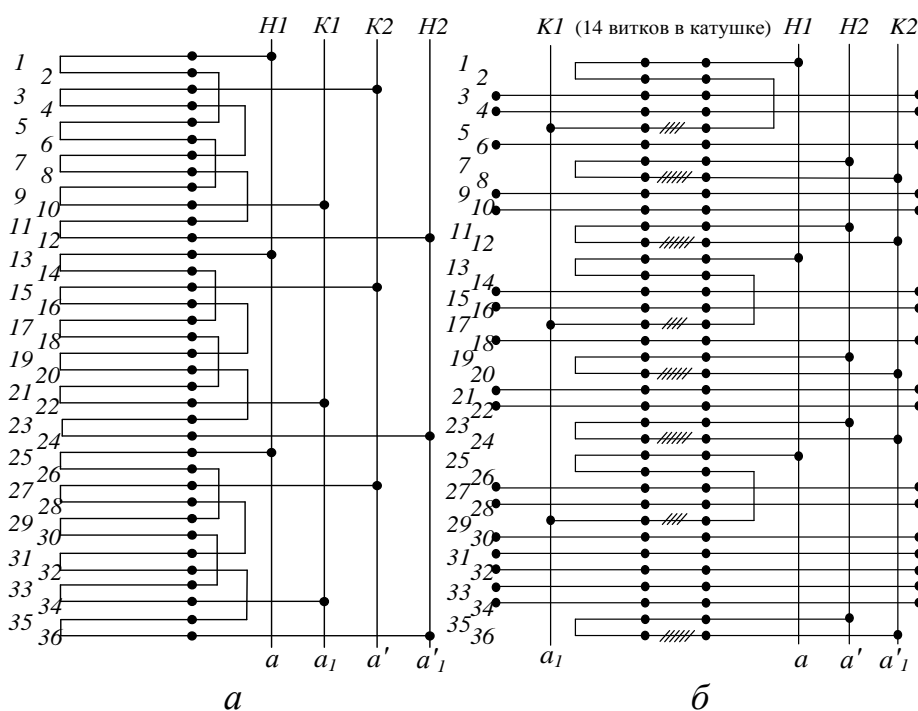


Рисунок 10 – Схема соединения вентильных обмоток трансформатора УМРУ-6300/35Ж1 на одном стержне: а – до реконструкции, б– после реконструкции

При этом исключаются уравнивательные реакторы, сетевые обмотки переключаются в «скользящий треугольник», а вентильные обмотки реконструируются из двух «обратных звезд» в «звезду» и «треугольник».

На рисунке 11, а показана выпрямительная схема, которая реконструируется из двух трехфазных нулевых мостовых схем в шестифазную кольцевую схему (рисунок 11,б). Сформированные ТПЧФ, нагруженные на свои кольцевые выпрямители, образуют два идентичных 12-ти пульсовых модуля, которые соединены между собой параллельно и формируют 24-х пульсовое выпрямленное напряжение. Расчеты показали, что данный вариант модернизации ТВА без значительных затрат может быть легко внедрен на ЖД транспорте с использованием существующего оборудования и повышающего  $\eta_{\Sigma}$  ТП на 0,9% в сравнении с находящимся в эксплуатации.

Одним из путей минимизации потерь электроэнергии на ТВА является повышение коэффициента использования установленной мощности ( $K_{исп,ум}$ ), который является основным показателем загруженности ТП.



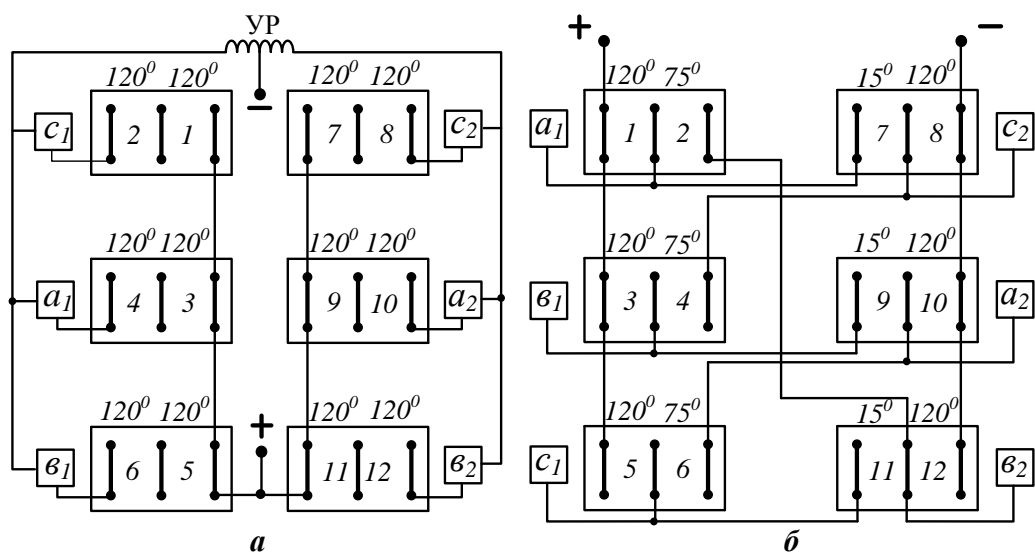


Рисунок 11 – Схемы вентильных соединений: *a* – до модернизации; *б* – после предлагаемой модернизации

Практически  $K_{исп,ум}$  на 85 % ТП повышенной мощности составляет 0,1...0,25, что приводит к неоправданным затратам и эксплуатационным расходам. Это свидетельствует о целесообразности создания ТВА с изменяемой номинальной мощностью. Этому требованию отвечает предлагаемый 24-х пульсовый модульный ТВА параллельного типа, который может снизить номинальную мощность на 50 % работой на одном модуле в 12-ти пульсовой режиме, что повышает технико-экономические показатели ТП, в том числе сократить потери электрической энергии более 100 тыс. кВт\*ч в год.

Концепция модульного построения многофазных ТВА повышенной мощности на основе последовательного и параллельного соединения идентичных ТВМ пониженной мощности, позволяет использовать в качестве ТПЧФ сухие трансформаторы ТРСЗПА-6300/10 которые обладают меньшими потерями электроэнергии на 27% в сравнении с масляными и повышают безопасность ТП.

Оценка годовой экономии электроэнергии при замене на ТП повышенной мощности Западно-Сибирской железной дороги - филиала ОАО «Российские железные дороги» (общее число подстанций около 90) одного 12-ти пульсового выпрямителя на новый 24-х пульсовый модульный ТВА при интенсивности движения поездов, обеспечивающих в среднем 40 % загрузки, составляет 238,8 МВт\*ч., за счёт увеличения коэффициента мощности и уменьшения потерь в вентильной конструкции. Дальнейшее увеличение коэффициента загрузки от 0,4 до 0,9 приводит к увеличению экономии почти в три раза и составляет 650,7 МВт\*ч., что больше чем у 24-го пульсового выпрямителя находящегося в эксплуатации на 25 % это подтверждает целесообразность использования модульного ТВА на грузонапряженных участках ЖД транспорта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получили дальнейшее теоретическое развитие и практическое решение проблемы энергоэффективности неуправляемых ТВА ТП. На основе теоретических и экспериментальных исследований показана целесообразность применения модульного 24-х пульсового ТВА, на грузонапряженных участках ТП постоянного тока для повышения их пропускной способности:

1) Теоретический анализ существующих и перспективных ТВА выявил тенденции повышающие энергоэффективность ТП, путем увеличения фазности преобразования и одновременного снижения энергопотребления. Разработаны новые экономичные кольцевые модульные 24-х пульсовые ТВА, удовлетворяющие этим требованиям, оригинальность которых защищена патентами РФ.

2) Получило теоретическое развитие концепция модульного построения многофазных ТВА на основе последовательного и параллельного соединения идентичных ТВМ пониженной мощности, что обеспечивает снижение массогабаритных показателей трансформаторов на 11% в сравнении с известным – 24-х пульсовым однотрансформаторным ТВА находящимся в эксплуатации.

3) Параллельное соединение ТВМ позволяет регулировать номинальную мощность ТВА путем чередования работы на одном или обоих модулях, что повышает коэффициент использования установленной мощности ТП и сокращает потери электрической энергии около 100 тыс. кВт\*ч в год.

4) Разработана методика, устанавливающая закономерности образования УПВ ТВА с параллельным соединением ТВС и кольцевыми вентильными структурами позволяющая, в целях снижения энергопотребления, осуществить рациональный выбор электрических характеристик вентилях.

5) Подтверждена достоверность результатов теоретических исследований модульных схмотехнических решений экспериментальными данными компьютерного и физического моделирования. Результаты свидетельствуют об увеличении энергетического КПД ( $\eta_{\Sigma}$ ) при последовательном соединении модулей на 0,4% и параллельном на 1,1%, в сравнении с известным ТВА.

6) Предложен вариант модернизации двух известных ТВА пониженной мощности по новому 24-х пульсовому решению, который без значительных затрат может быть легко внедрен на ТП ЖД транспорта с использованием существующего оборудования и повышающий  $\eta_{\Sigma}$  ТП на 1,1% в сравнении с известным ТВА.

7) Разработанные модульные ТВА позволяют снизить потери электроэнергии и повысить безопасность при замене у них масляных преобразовательных трансформаторов на аналогичные сухие, выпускаемые промышленностью и обладающие меньшими потерями электроэнергии до 27%.

8) Показано, что замена на ТП Западно-Сибирской железной дороги - филиала ОАО «Российские железные дороги» одного 12-ти пульсового выпрямителя на модульный 24-х пульсовый ТВА позволяет, при увеличении коэффициента загрузки от 0,4 до 0,9 увеличить экономию электроэнергии с 238,8 МВт\*ч., до 650,8 МВт\*ч., почти в три раза, что подтверждает об эффективности использования их на грузонапряженных участках.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Щуров, Н.И. Кольцевые схемы выпрямления для 12n-фазного преобразователя [Текст] / Н.И. Щуров, С.А. Евдокимов, О.Л. Волкова, А.А. Степанов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2010. – № 1. – С. 329 – 333.
2. Вильбергер, М.Е. Экспериментальные исследования режимов работы многопульсных выпрямителей [Текст] / М.Е. Вильбергер, О.Л. Волкова, Е.В. Олейникова, А.А. Степанов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2010. – №1. – С.323–325.
3. Щуров, Н.И. Перспективы применения кольцевых схем выпрямления на тяговых подстанциях электрического транспорта [Текст] / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, В.И. Сопов, О.Л. Волкова, А.А. Степанов // «Транспорт: наука, техника, управление». Научный информационный сборник. – М.: Изд-во ВИНТИ РАН, № 8, 2010. – С. 3 – 7.
4. Щуров, Н.И., Лестничный 12-пульсный вентильный преобразователь [Текст] / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, О.Л. Волкова, А.А. Степанов // Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: в 7 т. Т. 7. – Новосибирск: НГТУ, 2010 – С. 40 – 45.
5. Евдокимов С.А., К методам расчета установленных мощностей выпрямительных трансформаторов [Текст] / О.Л. Волкова, С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, А.А. Степанов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – №4 (41). – С. 155 – 160.
6. Щуров, Н.И. Преобразователи системы распределенного электроснабжения с улучшенной электромагнитной совместимостью / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, А.А. Степанов, М.М. Джаборов // Материалы XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: Т.7. Новосибирск: НГТУ, 2012. - С. 130 – 134.
7. Степанов, А.А. Применение несимметричных систем напряжения в многопульсовых схемах выпрямления для улучшения электромагнитной совместимости [Текст] / А.А. Степанов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2014. – №1-2. – С.292–296.

### Статьи в журналах и материалах конференций, входящих в международные базы SCOPUS и Web of Science:

8. Щуров, Н.И. Improving the energy efficiency of three-phase voltage converters using the Steiner method / Evdokimov, S.A., Shchurov, N.I., Volkova, O.L., Stepanov, A.A. // 2011 Russian Electrical Engineering 82(6), P. 281-287.
9. Evdokimov, S.A. Converters of distributed power supply system with higher electromagnetic compatibility / Evdokimov, S.A., Shchurov, N.I., Stepanov, A.A., Dzhaborov, M.M. // 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012 – Proceedings 6629087, P. 130-139.

10. Stepanov, A. A. Enhancing energy efficiency of electric transport traction substations based on multiphase rectification circuits / A. A. Stepanov // Proceedings of the 14 international forum on strategic technology (IFOST 2019); Tomsk, 14–17 Oct. 2019. – Tomsk : TPU Publ. House, 2019. – P. 577-580. - ISBN 978-5-4387-0906-0.

#### **Патенты на изобретения и полезные модели в РФ:**

11. Пат. РФ №2414044. Преобразователь переменного тока в постоянный с 18-кратной частотой пульсации [Текст] / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, О.Л. Волкова, А.А. Степанов, В.И. Сопов. – Бюл. №7, 2011.

12. Пат. РФ №12521870. Двадцатичетырехфазный преобразователь трехфазного напряжения в постоянное [Текст] / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, О.Л. Волкова, А.А. Степанов – Бюл. № 19, 2014.

13. Пат. РФ №142753. Двадцатичетырехпульсный преобразователь переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, О.Л. Волкова, С.В. Мятеж, В.И. Сопов, М.М. Джаборов. – Бюл. №19, 2014.

14. Пат. РФ №144509. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, В.И. Сопов, М.М. Джаборов, Е.А. Степанова, К.С. Волкова. – Бюл. №24, 2014.

15. Пат. РФ №144525. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, В.И. Сопов, М.М. Джаборов, Е.А. Степанова, К.С. Волкова. – Бюл. №24, 2014.

16. Пат. РФ №151148. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, В.И. Сопов, М.М. Джаборов, Е.А. Степанова, К.С. Волкова. – Бюл. №8, 2015.

17. Пат. РФ №175986. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. В.И. Сопов, С.В. Мятеж, Д.М. Стрельникова, Е.Г. Лангеман, А.В. Кулекина. – Бюл. № 36, 2017.

18. Пат. РФ №176682. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. В.И. Сопов, С.В. Мятеж, Д.М. Стрельникова, Е.Г. Лангеман, А.В. Кулекина. – Бюл. № 3, 2018.

Отпечатано в типографии  
Новосибирского государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
тел./факс. (383) 346-08-57  
Формат 60 x 64/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ №355. Подписано в печать 30.01.2020 г.