

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Щуров Николай Иванович

доктор технических наук, профессор

Новосибирск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1 ОБЗОР ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ...	11
ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА.....	11
1.1 Анализ технико-энергетических показателей многофазных трансформаторно-выпрямительных агрегатов применяемых на тяговых подстанциях постоянного тока.....	11
1.2 Требования предъявляемые к энергетическим показателям трансформаторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций .....	17
1.3 Основные способы повышения энергоэффективности трансформаторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций .....	21
1.4 Тенденции повышения энергоэффективности тяговых подстанций многопульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов.....	27
Выводы по главе 1 .....	42
Глава 2 АНАЛИЗ ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХ ПУЛЬСОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ МОДУЛЬНОГО ТИПА С КОЛЬЦЕВЫМИ ВЕНТИЛЬНЫМИ СХЕМАМИ.....	43
2.1 Фазо-аналитическая методика определения углов проводимости вентилей комбинированных многопульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов .....	43
2.2 Техничко-энергетические показатели при анализе электромагнитных процессов кольцевых двадцатичетырех пульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов модульного типа.....	50
2.2.1 Исследование двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с последовательным соединением модулей .....	51
2.2.2 Исследование двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с параллельным соединением модулей.....	66
2.3 Анализ режимов работы вентилей модульных трансформаторно-выпрямительных агрегатов с кольцевыми вентильными схемами.....	79
Выводы по главе 2.....	83
Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХ ПУЛЬСОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ МОДУЛЬНОГО ТИПА С КОЛЬЦЕВЫМИ ВЕНТИЛЬНЫМИ СХЕМАМИ .....	85

3.1 Исследование на компьютерных моделях в среде Matlab/Simulink .....	85
3.1.1 Результаты исследований двенадцати пульсового трансформаторно-выпрямительного модуля .....	87
3.1.2 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с последовательным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей .....	92
3.1.3 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с параллельным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей .....	97
3.1.4 Расчет энергетических характеристик модульных двадцатичетырех пульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математическим моделям .....	102
3.1.4.1 Расчет коэффициентов мощности трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математической модели .....	102
3.1.4.2 Расчет коэффициентов полезного действия трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математическим моделям .....	105
3.1.4.3 Расчет внешних характеристик трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математическим моделям .....	109
3.2 Экспериментальные исследования на физической модели .....	112
3.2.1 Результаты исследований двенадцати пульсового трансформаторно-выпрямительного модуля .....	116
3.2.2 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с последовательным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей .....	118
3.2.3 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с параллельным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей .....	120
Выводы по главе 3 .....	125
Глава 4 ПРИМЕНЕНИЕ ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХ ПУЛЬСОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	126
4.1 Реконструкция и модернизация трансформаторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций железнодорожного транспорта .....	127
4.1.1 Выбор и модернизация трансформаторного оборудования для формирования двенадцати пульсового выпрямительного модуля .....	129

4.1.2 Предложения по реконструкции нулевой мостовой вентильной схемы в кольцевую двенадцати пульсовую структуру.....	139
4.2 Определение экономической эффективности переоборудования двенадцати пульсовых выпрямительных агрегатов тяговых подстанций на модульные двадцатичетырех пульсовые трансформаторно-выпрямительные агрегаты кольцевого типа.....	145
Выводы по главе 4.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ .....	168

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В соответствии с «Энергетической стратегией России на период до 2030 года» задача снижения затрат на потребление электрической энергии – как индикатор энергетической эффективности экономики [1]. Одной из наиболее энергоемкой отраслью экономики является электрический транспорт, особенно системы тягового электроснабжения постоянного тока. Существующие системы тяги постоянного тока не в полной мере отвечают современным требованиям увеличения транспортных потоков и нарастания объемов перевозок – это приводит к возрастанию нагрузки в тяговых сетях и соответственно увеличению рабочих токов при заданном напряжении [2-5]. Вызванное этим увеличение потребления мощности электроподвижным составом (ЭПС) приводит к снижению напряжения в системе «тяговая подстанция (ТП) – тяговая сеть – ЭПС». Это, в свою очередь, ведет к снижению мощности на ЭПС и, соответственно падению скорости его движения. Снижение напряжения в тяговой сети при возрастании тока нагрузки до максимальных значений вызвано с уменьшением выпрямленного напряжения на выходе ТП, что ограничивает пропускную способность систем тягового электроснабжения [6]. В силу указанных обстоятельств появляются требования к трансформаторно-выпрямительным агрегатам (ТВА) ТП по повышению стабилизационных свойств выпрямленного напряжения и снижению потерь электроэнергии [7]. Для успешного решения проблемы разработан ряд способов, которые для стабилизации выпрямленного напряжения применяют дополнительное оборудование, приводящие к возрастанию стоимости и энергопотреблению ТВА [8].

Одним из рациональных путей стабилизации выпрямленного напряжения и снижения потерь электроэнергии на ТВА является применение многофазных выпрямителей (МВ) [9]. Они выполнены 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 [10-11].

Диссертационное исследование выполнено на основе результатов работ ученых и исследователей, которые занимались вопросами анализа и исследования вопросов

повышения энергоэффективности работы ТП систем 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.

В известных работах наряду с решением проблемы повышения стабилизационных свойств выпрямленного напряжения ТВА недостаточное внимание уделено вопросу одновременного снижения энергопотребления. Таким образом, развитие и совершенствование многофазных ТВА, повышающих энергоэффективность ТП, является актуальной задачей в условиях увеличения транспортных потоков и нарастания объемов перевозок.

**Целью диссертационного исследования** является повышение энергоэффективности тяговых подстанций постоянного тока новыми техническими решениями 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 вентилей 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:** оптимизация энергетических характеристик ТВА, обуславливающие энергоэффективную работу ТП постоянного тока.

**Методы исследований.** 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 модульных многофазных ТВА, позволяющие снизить потери электроэнергии и повысить стабильность выпрямленного напряжения на шинах ТП постоянного тока.

2. Методика, устанавливающая взаимосвязь фазовых структур вентильных обмоток (ВО), вентилей 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 вентилей 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, цифрового моделирования в среде MatLAB/Simulink с исследованиями физических моделей.

**Научная новизна.** 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 вентилей многопульсовых ТВА с параллельным соединением выпрямительных секций и кольцевыми вентильными структурами.

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

4. Получены расчетные соотношения, определяющие энергетические потери в вентильных 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 ТВА, 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 «РЖД».

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, постановке и решения задачи рационального построения ТВА с минимизацией потерь электроэнергии и установленной мощности, составление аналитических соотношений, разработке расчетных и математических моделей являющиеся продолжением развития основ 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.

#### **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; Инновационная энергетика 2010: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (10–12 ноября 2010 г.), г. Новосибирск; Материалы XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (2–4 октября 2012г.), г. Новосибирск; Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука технологии инновации» (2–4 октября 2013), г. Новосибирск; Материалы трудов XIX всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность» (4-6 декабря 2013 г.), г. Томск; Сборник научных трудов II Всероссийской конференции молодых

ученых «Фундаментальные и прикладные исследования»: – Новосибирск: НГТУ, 2016; Материалы XXI Международной научно-практической конференции «EurasiaScience» 15 мая 2019, г. Москва; Материалы XXII Международная научно-практическая конференция «Российская наука в современном мире» 31 мая 2019, г. Москва.

### **Публикации.**

По теме диссертационной работы опубликованы – 27 печатных работ, 7 из которых – в ведущих журналах, рекомендованных списком ВАК, 3 – в изданиях индексируемых в наукометрических базах Web of Science, Scopus, IEEE, 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.

# Глава 1 ОБЗОР ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## 1.1 Анализ технико-энергетических показателей многофазных трансформаторно-выпрямительных агрегатов применяемых на тяговых подстанциях постоянного тока

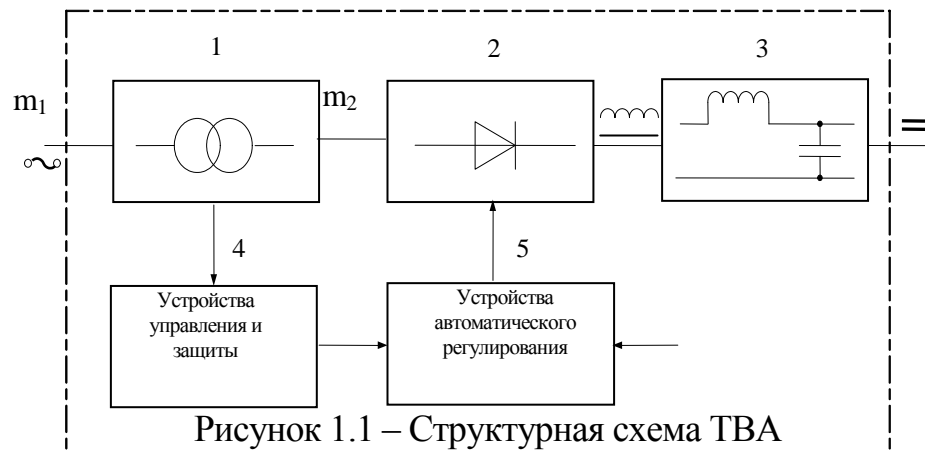
На тяговых подстанциях постоянного тока электрического транспорта как правило применяются неуправляемые ТВА, благодаря их простоте, надёжности и удобства в эксплуатации [12-13]. В процессе эксплуатации неуправляемых ТВА установлено, что достигается высокий коэффициент мощности и наименьшее воздействие гармонического состава на системы управления и линии связи, при этом теоретически частота пульсаций применяемых выпрямителей трёхфазного тока не ограничена. Известно, что переход к многопульсовым выпрямителям (МВ) улучшает показатели электромагнитной совместимости в системе электроснабжения и способствует сокращению потерь электроэнергии [14-16]. Так, один только переход от 6-ти к 12-ти пульсовым выпрямителям повышает КПД ТП приблизительно на 1-1,5%, а коэффициент мощности на 4-5% [17]. По этой причине практически большинство ТП железнодорожного транспорта, электрифицированного постоянным током напряжением 3,3кВ, в свое время были переоборудованы с 6-ти на 12-ти пульсовый режим выпрямления [2, 10].

Дальнейшее повышение пульсности выпрямления, как показывает теория, могло бы дополнительно улучшить энергетические показатели как самих ТВА, так и всей системы электроснабжения в целом [18]. Однако такой переход на практике встречает определенные трудности. Основная причина заключается в проблеме построения рациональных схем выпрямителя.

Наибольшее применение на электрическом транспорте нашли трёхпульсовые, шестипульсовые и двенадцатипульсовые выпрямительные агрегаты. Выпрямительные агрегаты с большим числом пульсаций применяются реже. В состав ТВА ТП постоянного тока в общем случае, (рисунок 1.1) входят: 1 – преобразовательный трансформатор (ПТ); 2 – выпрямитель на вентилях; 3 –

сглаживающий фильтр; 4 – устройство защиты выпрямителя и управление им ; 5 – регулирование выпрямителя автоматическое [19].

Вентильный выпрямитель представляет собой схему построенную на основе диодов (тиристоров), при автоматизации на основе силовых транзисторов.



В некоторых случаях отдельные звенья ТВА (рисунок 1.1) могут отсутствовать. В ТВА с неуправляемыми вентильными схемами на диодах, отсутствуют системы автоматического регулирования и управления. Если не предъявляются жесткие требования к качеству выпрямленного напряжения, могут отсутствовать и сглаживающее устройство.

Наибольшее применение нашли в системах тягового электроснабжения постоянного тока ТВА с мостовыми также с нулевыми схемами выпрямления. Преобразовательные трансформаторы питающие выпрямители по нулевой схеме, имеют следующие соединения: первичной - сетевой обмотки (СО) «в звезду» или «треугольник» а вторичные - вентильные обмотки (ВО) – в «звезду» или «две обратные звезды с уравнительным реактором». В трансформаторе для шестипульсовых выпрямителей с мостовыми схемами сетевая обмотка имеет соединение «в звезду», а вентильная обмотка – в «треугольник». При преобразовании переменного тока в постоянный (выпрямленный), на электрическом транспорте, применяют преобразователи на полупроводниковых приборах – диодах или тиристорах.

Тем не менее, из всего разнообразия схем наибольшее распространение на практике получили следующие схемы:

- трехфазная схема с нулевым выводом;
- две обратные звезды с уравнительным реактором;
- трехфазная мостовая схема.

Выпрямитель, собранный по схеме Ларионова, характеризуется сравнительно хорошими технико-экономическими показателями: эффективным использованием трансформатора, малым коэффициентом пульсаций, относительно высоким КПД [20-22]. Также к преимуществам трехфазной мостовой схемы относится: отсутствие намагничивания сердечника трансформатора; меньшая типовая мощность трансформатора в сравнении с другими схемами выпрямления из-за чисто переменного тока обмоток. Двенадцатипульсовые схемы выпрямления построенные по эквивалентным схемам выпрямления основой которых выступают два и более шестипульсовых выпрямителей по схеме Ларионова, соединенных по выходу последовательно или параллельно. установленные на ТП Западно-Сибирской железной дороги, подтверждают энергетическую эффективность от их внедрения. Тяговые подстанции постоянного тока на магистральных электрических железных дорог оборудованные двенадцатипульсовыми мостовыми схемами выпрямления вместо шестипульсовых по данным 1997 года заменено 526 выпрямителей, что составило 25% от общего количества и это улучшило форму сетевого тока и выпрямленного напряжения, уменьшило электромагнитное влияние тяговой сети на смежные устройства в том числе потери электрической энергии, снизило колебания напряжения контактной сети и упрощает схемы сглаживающих фильтров [2]. В среднем коэффициент полезного действия ТВА ТП из-за перевода с 6-ти на 12-ти пульсовые схемы выпрямления вырос на 0,3...0,7%, а рост коэффициента мощности – на 3–6%, достиг значений 0,92...0,97 [11].

Исходя из этого, на практике была подтверждена возможность многопульсовых ТВА повышать качество электроэнергии как в контактной сети, так и в целом в системе электроснабжения постоянного тока электрического транспорта, что обеспечивает высокий уровень электромагнитной совместимости между ними.

В таблице 1.1 приведены сводные расчетные соотношения основных схем выпрямления применяемых на ТП постоянного тока [18, 23-24].

Таблица 1.1 – Основные расчетные соотношения схем выпрямления

Схемные решения выпрямителя	Параметры											
	трансформаторов					вентилей					пульсаций	
	$S_T/P_d$	$K_{исп}$	$I_2/I_d$	$U_2/U_d$	$(I_1/I_d)/K_T$	$U_{обр\ max}/U_d$	$I_{a\ сред}/I_d$	$I_{a\ макс}/I_d$	$I_{a\ эфф}/I_d$	$\lambda_{эл.г\ р\ а\ д.}$	$m^*q$	$K_{П}$
3-х пульсовая с нулевым выводом	1,57	0,64	0,58	0,86	0,472	2,09	0,333	1,0	0,58	120	3	0,25
6-ти пульсовая (две обратные звезды с нулевым выводом + УР)	1,26 +0,0 7	0,8	0,289	0,855	0,408	2,09	0,166	0,5	0,289	120	6	0,057
6-ти пульсовая мостовая	1,05	0,95	0,817	0,434	0,817	1,045	0,333	1,0	0,578	120	6	0,057
12-ти пульсовая параллельного типа + УР (2-х мостовая)	1,029 +УР	0,97	Y 0,41	Y 0,427	0,789	1,045	0,166	0,5	0,289	120	12	0,014
12-ти пульсовая последовательного типа (2-х мостовая)	1,029	0,97	Y 0,817	Y 0,214	1,578	0,523	0,333	1,0	0,578	120	12	0,014

По данным этой таблицы можно сравнить параметры трансформаторов, вентилях и нагрузки, характеризующие основные схемы выпрямления, которые

применяются в настоящее время на тяговых подстанциях электрического транспорта постоянного тока.

Нулевая трёхпульсовая схема:

-достоинства – выгодно при мощностях выпрямителя не более десятков киловатт;

-недостатки – наличие потока вынужденного намагничивания трансформатора, создаваемого протекающим через вторичную обмотку постоянной составляющей тока.

Шестипульсовая (две обратные звезды с нулевым выводом + УР):

-достоинства – это большой выпрямленный ток, отсутствие вынужденного намагничивания сердечника трансформатора, небольшая частота пульсаций (шестикратная) и ее величина на нагрузке;

-недостатки – применение трансформатора с двумя ВО и уравнивающего реактора (УР) на который увеличивает активные потери в схемном решении.

Мостовая шестипульсовая схемы:

-достоинства – меньше типовая мощность трансформатора, более высокий КПД, сравнительно малый коэффициент пульсаций, отсутствию намагничивания сердечника трансформатора;

-недостатки – увеличение количества вентилях до шести вместо трёх как у трехфазной нулевой, что если применять вентили с большим внутренним сопротивлением, то увеличиваются потери в ТВА.

Мостовой 12-ти пульсовая параллельная схема с УР:

-достоинства – 12-ть пульсаций за период, большой выпрямленный ток в двое по сравнению со схемой последовательного типа; уменьшение числа вентилях в цепи тока нагрузки в два раза меньше в сравнении со схемой последовательного типа;

-недостатки – потери активной мощности на УР, применение которого приводит к возрастанию суммарной установленной мощности трансформаторного оборудования на 7 %, при неравномерной питающей сети возникает неравномерность загрузки выпрямительных секций приводящая к возникновению неканонических пульсаций и увеличению гармонического состава. [17-18].

Мостовая 12-ти пульсовая последовательного типа:

-достоинства –12 пульсаций выпрямленного напряжения за период, нет необходимости использования УР;

-недостатки – увеличение потерь активной мощности в вентилях так как в цепи протекания тока нагрузки участвуют четыре вентиля.

Широкое распространение тяги постоянного тока, особенно на электрифицированном железнодорожном транспорте, и назревшая необходимость вывода из эксплуатации устаревшего оборудования на тяговых подстанциях предопределяют необходимость совершенствования выпрямителей переменного тока в постоянный. Для нормального функционирования потребителей в первую очередь требуется качественное напряжение. А его качество напрямую зависит от количества пульсаций в преобразователе. Чем больше пульсаций, тем меньше потери энергии при выпрямлении, у потребителей в питающих линиях передач меньше высших гармоник, которые не только вызывают помехи в бытовой электронике, электротехнике и линиях связи, но и снижают эффективность работы самих ТВА. Увеличение пульсности выпрямленного напряжения ведет к снижению массогабаритных и стоимостных показателей сглаживающих фильтров [18, 25].

Исходя из анализа технико-энергетических показателей применяемых ТВА на электротранспорте можно сделать вывод, что одним из основных способов повышения энергетической эффективности при выпрямлении переменного тока в постоянный является повышение пульсности выпрямителей. Приведенные данные в таблице 1.1 показывают, что переход от шестипульсовых к двенадцатипульсовым схемным решениям повышает энергетические показатели ТВА, увеличивается коэффициент мощности, улучшается форма кривой потребляемого тока, снижается процентный состав высших гармоник в потребляемом токе.



## **1.2 Требования предъявляемые к энергетическим показателям трансформаторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций**

ТВА ТП тягового электроснабжения постоянного тока разрабатываются в соответствии с характером тяговой нагрузки, пиковыми нагрузками, перегрузками в основных режимах работы (нормальный, утяжеленный, аварийный тяговых подстанций, качеством преобразования электроэнергии, экономичностью и эксплуатационной надежностью. Нагрузка выпрямителей тяговых подстанций постоянного тока является очень неравномерной. Трансформаторно-выпрямительные агрегаты тяговых подстанций в зависимости от вида транспорта также определённых значений перегрузок определены стандартом ГОСТ 18142.1 – 85 [26]. Из которого следует, что перегрузки выпрямителей для трамвая и троллейбуса относят к 8-му режиму нагрузок, при этом нагрузка превышает номинальную на 25% и не должна длиться более 15 мин с цикличностью один раз в 2 часа; а перегрузка в 50% должна длиться не более – 2 мин с временным промежутком один раз в час; перегрузка 100% в течении – 2 секунд, с временным промежутком один раз в 20 суток. При этом не должно превышать номинальный ток выпрямителя среднеквадратичное значение тока за время усреднения (любые 30 мин), а если в течение этого времени происходит перегрузка 100%, то время усреднения должно быть сокращено до 5 мин.

Выходное напряжение выпрямителей тяговых подстанций магистральных железных дорог и напряжение в контактной сети определяется при номинальной нагрузке в соответствии с ГОСТ 6962 – 75 [27] составляет 3,3 кВ. При этом напряжение максимальное в контактной линии не должно превышать 4,0 кВ. Выпрямители должны быть рассчитаны на перенапряжения 9000 В на стороне выпрямленного напряжения. Уровни напряжения в тяговых сетях постоянного тока для ЖД транспорта и ГЭТ определены требованием ГОСТ 6962 – 75 и приведены в таблице 1.2, где:

1. Значения в скобках – для рекуперативное торможение где оно предусмотрено;
2. Наименьшее допустимое напряжение при любых эксплуатационных условиях в тяговой сети (на ЭПС) –, за исключением коммутационных режимов.

Таблица 1.2 – Уровни напряжения для различных типов транспорта в тяговых сетях

Вид электрического транспорта		$U$ на шинах подстанции, В		$U$ на токоприемниках ЭПС, В		
		Номинальное	Наибольшее	Номинальное	Наибольшее	Наименьшее
ЖД	магистральный постоянного тока	3300	3850	3000	3850 (4000)	2200
	метрополитен	825	975	750	975	550
ГЭТ	трамвай, троллейбус	600	700	550	700 (720)	400

На тяговых подстанциях электрического транспорта широко распространены неуправляемые выпрямители, которые просты и надежны в эксплуатации.

При этом они позволяют достигать высокий коэффициент мощности и минимальное мешающее воздействие высших гармонических составляющих на линии связи и управления без существенных затрат. Так на магистральных электрических железных дорогах постоянного тока внедрены и используются 12-ти пульсовые ТВА в течение длительного времени, технико-энергетические показатели которых перед применявшимися ранее 6-пульсовыми доказаны исследованиями и опытом эксплуатации.

В системах электроснабжения метрополитена и городского электрического транспорта подтверждена эффективность 12-ти пульсовых ТВА также результатами их использования [28-29]. Увеличение транспортных потоков и объема грузоперевозок на электрическом транспорте ведет к необходимости увеличения провозной и пропускной способности.

Для реализации этих требований необходимо внедрять мероприятия по увеличению скоростей движения и весовых норм электропоездов, создаются новые электровозы большей мощности.

Так на железнодорожные линии системы электроснабжения постоянного тока поступают с увеличенной мощностью новые локомотивы 2ЭС6 «Синара», 2ЭС10 «Гранит» [2, 5, 8, 30], оснащенных интеллектуальным управлением электропривода и

системами энергооптимального автоматического ведения поезда, что позволяет решать поставленные задачи увеличение весовых характеристик поездов при снижении удельных энергозатрат. В настоящее время существующие системы тяги постоянного тока не в полной мере отвечают современным требованиям нарастания объемов перевозок и увеличению транспортных потоков, приводящих к увеличению нагрузок в тяговых сетях; особенно это характерно для системы напряжением 3,3 кВ. Увеличение мощности ЭПС электрического транспорта, связано с необходимостью обеспечения растущих объемов перевозок и повышения массы электропоездов, вызывает возрастание рабочих токов при заданном напряжении, это увеличивает потери напряжения в системах «преобразовательный агрегат – тяговая сеть – электроподвижной состав». Причина уменьшения напряжения в тяговой сети связана с уменьшением выпрямленного напряжения на выходе преобразовательного агрегата при увеличении тока нагрузки до максимальных значений, что ограничивает пропускную способность железных дорог. Аналогичная ситуация в тяговом электроснабжении метрополитена и городского электротранспорта городов России с числом жителей миллион и более, где городская транспортная проблема увеличение общего пассажиропотока, особенно в часы пик, приводит к увеличению нагрузки на ТВА ТП до их максимальных значений, что в свою очередь, также ограничивает пропускную способность.

В силу указанных обстоятельств, накладываются определенные требования к ТВА, прежде всего снижение потерь электроэнергии в процессе преобразования переменного тока в постоянный и повышение стабилизационных свойств выпрямленного напряжения.

Электрический транспорт обладает нелинейной нагрузкой большой мощности, что влияет на качество электроэнергии и приводит к искажению формы сетевого напряжения системы внешнего электроснабжения. Результаты измерений показателей качества электроэнергии (ПКЭ) на первичных шинах внешних систем электроснабжения 6, 10, 35 и 110 (220) кВ на всех ТП не обеспечиваются нормативные значения указанные в ГОСТ 32144-2013 в виде показателей качества электроэнергии по высшим гармоникам[31-32]. С возрастанием требований к

качеству электроэнергии и усиливается давление энергоснабжающих организаций на потребителей электроэнергии чтобы не ухудшалось ими качества электрической энергии в процессе потребления. Федеральная энергетическая комиссия, Госэнергонадзор разработали проект нормативного документа «Неустойки при поставке электрической энергии пониженного качества по вине энергоснабжающей организации и ухудшении качества электрической энергии в сети общего назначения по вине потребителя»[2]. Такие условия вынуждают электрический транспорт на постоянном токе оплачивать неустойку за значительное ухудшение качества электроэнергии в сети внешнего электроснабжения. По этому необходимы способы снижения несинусоидальности в системах тягового электроснабжения постоянного тока. Одним из перспективных способов снижения несинусоидальности в электрических сетях является улучшение форм кривой сетевого тока ТВА. Это реализуется компенсацией высших гармоник магнитного потока преобразовательного трансформатора, путем наложения токов высших гармоник на токи обмоток трансформатора. Можно также использовать сложные фильтрующие компенсирующие устройств а[33]. Недостатком метода является сложность технической реализации. Одним из эффективных способов уменьшения гармонического состава сетевого тока выпрямителя - это использование специального выполнения обмоток преобразовательного трансформатора, позволяющее реализовать необходимый многофазный режим преобразования. Применение трансформаторов с увеличенным числом фаз позволяет реализовать многопульсовые схемы выпрямления учитывая, что чем больше фазность выпрямления, тем меньше уровень высших гармоник в сетевом токе, необходима и целесообразно модернизация ТВА ТП постоянного тока по многопульсовым схмотехническим решениям[10, 11, 18, 34, 35]. Это позволит снизить потребление электроэнергии, уменьшит негативное влияние на потребляемую сеть повышения и в целом увеличит пропускную способность систем тягового электроснабжения.

Необходимость модернизации и реконструкции ТВА ТП постоянного тока для стабилизации выпрямленного напряжения осознают отечественные и зарубежные ученые, которые ведут поиски наиболее рациональных путей [18, 25]. Энергетическая

эффективность электрической тяги напрямую зависит от величины напряжения при передаче электроэнергии к ЭПС (потребителю), понижение напряжения на токоприемнике поездов снижает скорость движения, а при сохранении потребляемой мощности происходит увеличение тока электровоза и соответственно потери электрической энергии в тяговой сети.

Снижение выходных напряжений на шинах ТП при увеличении их нагрузки до максимальных значений связано с естественной падающей внешней характеристикой ТВА, что приводит к понижению напряжения в тяговой сети рисунок 1.2.

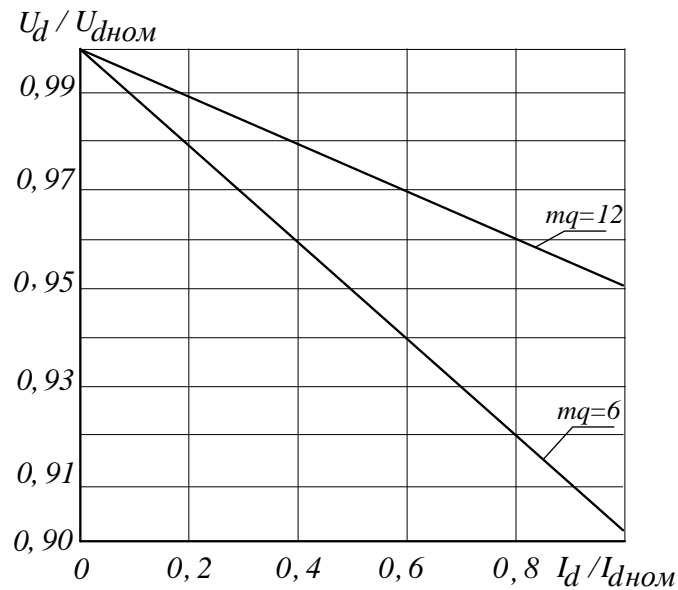


Рисунок 1.2 – Внешние характеристика ТВА

Поэтому мероприятия, проводимые по повышению энергетической эффективности тягового электроснабжения постоянного тока, направлены в основном на решение задач повышения энергетической эффективности ТВА которые сводятся, в первую очередь, к повышению стабилизационных свойств выпрямленного напряжения под нагрузкой[36, 37].

### 1.3 Основные способы повышения энергоэффективности трансформаторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций

Опыт разработок и исследований показывает, что устранение ограничений по напряжению и токовым нагрузкам в ТВА ТП постоянного тока может быть решено с наименьшими затратами. Использование существующего и, в том числе новых типов

преобразовательных трансформаторов обеспечивающих решение поставленных задач с помощью внедрение нового перспективного оборудования ТП включающие в себя системы и устройства повышения напряжения и автоматического регулирования выпрямленного напряжения которые отображены на (рисунок 1.3).

Повышение выпрямленного напряжения на выходе ТВА достигается увеличением напряжения холостого хода ( $U_{d0}$ ) которое реализуется двумя подходами первое это повышение напряжения на сетевых обмотках трансформатора и второе увеличение за счет увеличения  $U_d$ .

Первый эффективное техническое решение повышения напряжения холостого хода ТВА используется переключение числа витков (анцапф) преобразовательных трансформаторов . Преобразовательные трансформаторы оснащены регуляторами напряжения без возбуждения, т. е. после отключения всех обмоток трансформатора от сети. Такой вариант регулирования называют ПБВ (переключение без возбуждения).

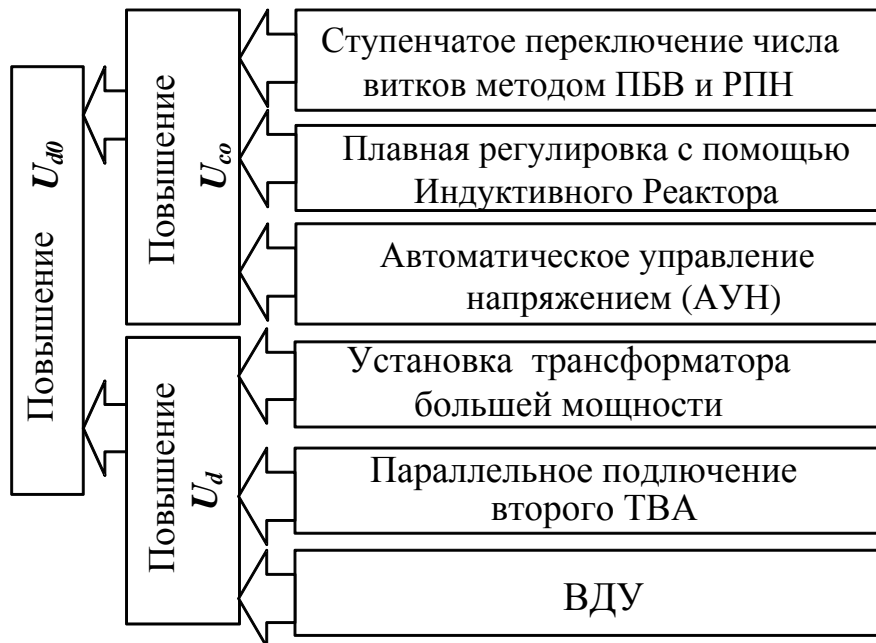


Рисунок 1.3 – Способы стабилизации выпрямленного напряжения

Наиболее распространено регулирование напряжения ступенчатым изменением числа витков первичных обмоток. Устройства ПБВ просты по конструкции и относительно дешевы но вместе с тем, при переключении без возбуждения потребитель на это время отключают от сети и вызывают значительные скачки

напряжения и тока. Эффективное решение повышения напряжения холостого хода - это способ регулировки напряжения без перерыва нагрузки т.е. без отключения трансформатора от сети. Такой способ регулирования называют РПН (регулирование под нагрузкой). Однако РПН требует сложных и дорогих переключающих устройств, поэтому трансформаторы РПН устанавливают только там, где это дает заметный экономический эффект. Недостаток повышение напряжения холостого хода преобразователей ограничивает применение электрического рекуперативного торможения и, как следствие, приводит к снижению безопасности движения поездов [22, 25, 34].

Для устранения этого недостатка используется регулировка напряжения в первичной или вторичной обмотках трансформатора с помощью индуктивного реактора, что в место ступенчатой обеспечивает плавную регулировку выпрямленного напряжения. Но этот способ требует постоянной регулировки при изменении нагрузки, что требует автоматической регулировки напряжения.

Оно реализуется на технической основе тягового трансформаторного оборудования с бесконтактным автоматическим 20 % диапазоном регулирования выпрямленного напряжения тяговых подстанций. К нему относятся: (трансформаторы ТДПУ-20000/10(35), ТДП-16000/10(35), ТРДП-16000/10(35); реакторы РТДП-6300/10(35); шкафы автоматического регулирования напряжения типа ШАУН) предназначенные для схем преобразования две обратные звезды с уравнивающим реактором, трёхфазных мостовых (6- и 12-пульсовых) [2, 4, 7, 8]. Это позволило увеличить номинальное напряжение на выходе агрегата на 100 В, повысить КПД и коэффициент мощности, снизить гармонический состав выпрямленного напряжения и эквивалентное мешающее напряжение.

Реализация второго подхода изменения выпрямленного напряжения применяется на тяговых подстанциях установкой на ТП более мощных преобразовательных трансформаторов, которые имеют большой запас мощности повышая номинальное напряжение, без увеличения напряжения холостого хода. Но он приводит к неполному использованию установленной мощности и дополнительным потерям энергии.

Для устранения этого недостатка используется параллельное включение второго ТВА позволяющее без увеличения напряжения холостого хода повысить номинальное напряжение [38-39]. Такое решение требует наличия дополнительного ТВА, но значительно снижает коэффициент использования установленной мощности ТП.

Следующий способ реализации второго подхода - это автоматическое регулирование выходного напряжения ТВА с помощью установки на существующих тяговых подстанциях вольтодобавочных устройств (ВДУ) с бесконтактным автоматическим регулированием выпрямленного напряжения. Вольтодобавочные устройства для 12-ти пульсовых преобразовательных агрегатов внедрены на тяговых подстанциях 12-ти пульсовых преобразовательных агрегатов с трансформаторами ТРДП-12500/10 ЖУ1 взамен 6-пульсовых [40-41]. Это позволило увеличить номинальное напряжение на выходе агрегата на 100 В, повысить КПД и коэффициент мощности, снизить гармонический состав выпрямленного напряжения и эквивалентное мешающее напряжение. Обладая высокой энергоэффективностью рассмотренные способы плавной регулировки выпрямленного напряжения требуют переоборудования неуправляемых ТВА ТП в управляемые. Для этого необходима дополнительная установка оборудования и трансформаторов повышенной мощности, управляемых реакторов, для ВДУ -вольтодобавочные преобразователи, блоки сглаживающих и помехоподавляющих реакторов, а также системы управления и контроля для обоих способов [42-43]. Все это ведет к усложнению и увеличению стоимости ТВА, кроме того возрастают значительные потери мощности на дополнительном оборудовании.

Другим техническим решением, не требующий увеличения капиталовложений в оборудование ПА, применяемых на тяговых подстанциях и позволяющим без увеличения напряжения холостого хода повысить номинальное напряжение преобразовательного агрегата - это замена на ТП явилась нулевых и мостовых 6-ти пульсовых на 12-ти пульсовые ТВА позволяющие без увеличения напряжения холостого хода повысить номинальное напряжение ТП. Но в этом случае повышение номинального напряжения ТВА на 100...120 В оказалось недостаточным



для обеспечения повышения пропускной и провозной способности электрифицированных участков постоянного тока[2].

Одним из эффективных решений это использование преобразовательных трансформаторов реализующих многофазный режим 18, 24, 36 и 48 – пульсового преобразования [9-11, 18, 25, 44]. С такой частотой пульсации выпрямленного напряжения ТВА обладают более «жесткой» внешней характеристикой, у которых выпрямленное напряжение с приближением тока нагрузки к  $I_{дном}$  уменьшается незначительно, т.е. обладают хорошими стабилизационными свойствами по сравнению с 12-ти пульсовыми выпрямителями. Так, на полигоне магистральных электрических железных дорог постоянного тока внедрено на тяговой подстанции г.Омск и в течение продолжительного времени используется 24-х пульсовый ТВА [25, 45]. Его технико-экономические преимущества перед применяющимися 12-ти пульсовыми ТВА убедительно доказаны исследованиями и опытом эксплуатации. Исследования, расчёты и данные эксплуатации опытного образца 24-х пульсового ТВА, доказывают правомочность использования в системах электроснабжения постоянного тока. При применении 24-х пульсовых выпрямителей коэффициент мощности повышается до 0,985...0,995 против 0,91...0,93 для 6 пульсового и 0,96...0,97 для 12-ти пульсового выпрямителя. Коэффициент наклона внешней характеристики снижается до 0,13 против 0,52 для 6 пульсового и 0,26 для 12 пульсового выпрямителя. В сетевом токе отсутствуют гармоники с номерами 5, 7, 11, 13, 17, 19, ..., что приводит к улучшению показателей качества электрической энергии питающей сети[15, 32, 46-47].

Анализ многопульсовых ТВА ТП постоянного тока [2, 14, 18, 48] показывает, что основной энергетической характеристикой является внешняя характеристика (ВХ), определяющая уровень напряжения на выходе в зависимости от величины выпрямленного тока  $U_{dm}(I_{dm})$ , что выражается формулой:

$$U_{dm}(I_{dm}) = U_{d0} \left( 1 - \sin \frac{\pi}{m} u_k \frac{I_d}{I_{дном}} \right), \quad (1.1)$$

где  $A = \sin \frac{\pi}{m}$  – коэффициент наклона внешней характеристики (ВХ), который с увеличением числа пульсаций  $m$  выпрямленного напряжения уменьшается и

составляет: для 6-ти пульсовых – 0,52; для 12-ти пульсового – 0,26; для 24-х пульсового – 0,13. Если принять, что для трех ТВА числа пульсаций  $m = 6$ ;  $m = 12$ ;  $m = 24$ , а их значения  $U_{dн0}$ ;  $S_{ном}$ ;  $u_k$ ; будут одинаковыми, то их внешние характеристики в соответствии с формулой (1.1) будут выглядеть следующий образом (рисунок 1.4).

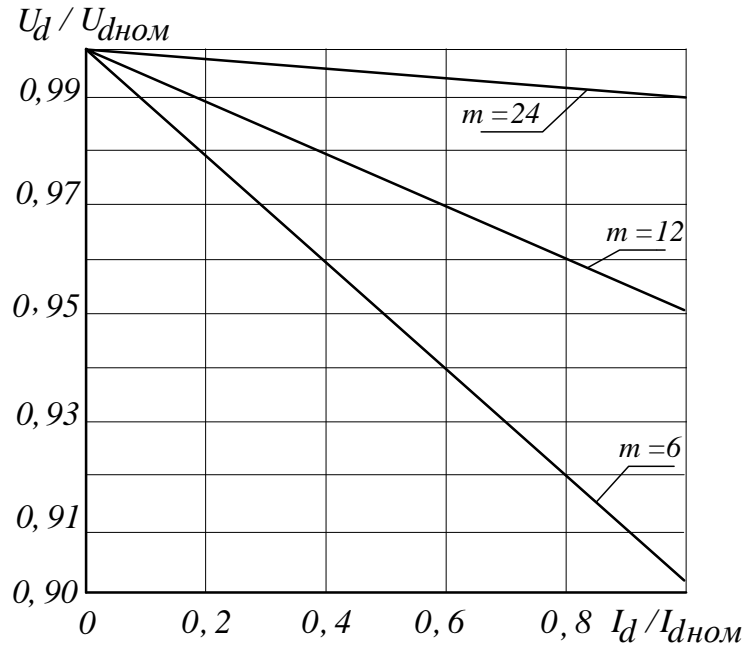


Рисунок. 1.4. – Внешние характеристики ТВА

Проведенный анализ полученных ВХ (рисунок 1.4) показывает:

- лучшей стабильностью напряжения при больших нагрузочных токах, обладают 24-х пульсовые выпрямитель;
- коэффициент мощности при применении 24-х пульсового ТВА повышается до 0,985...0,995 против 0,91...0,93 у 6-ти пульсового и 0,96...0,97 у 12-ти пульсовых выпрямителей;
- в сетевом токе 24-х пульсового ТВА отсутствуют гармоники с номерами 5, 7, 11, 13, 17, 19, ..., которые характерны для 6-ти и 12-ти пульсовых выпрямителей, что ведет к улучшению показателей качества электрической энергии питающей сети и оптимизации параметров сглаживающих фильтров.

Приведенный анализ основных энергетических показателей ТВА подчеркивает, что увеличение числа пульсаций выпрямленного напряжения до 24, значительно

улучшает энергоэффективность путём снижения мешающего воздействия высших гармонических составляющих, повышения коэффициента мощности и стабилизации выпрямленного напряжения при повышении тяговой нагрузки до ее номинальных значений, удовлетворяющих современным требованиям тягового электроснабжения постоянного тока[25, 50-51].

На основании вышеизложенного следует вывод, что более эффективным способом повышения энергоэффективности ТВА ТП является применение многопульсовых схем выпрямления и инвертирования с частотой пульсации более 12-ти.

#### **1.4 Тенденции повышения энергоэффективности тяговых подстанций многопульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов**

В условиях постоянного роста стоимости энергетических ресурсов большое значение приобретает снижение расхода и повышение качества электрической энергии. Поэтому вновь разрабатываемые ТВА должны при минимальной материалоемкости и стоимости обладать высокими энергетическими показателями, и это возможно при повышении пульсности выходного напряжения выпрямителей со значения 12 до значений 18, 24, 30, 36, 42, 48 и т.д. Повышение пульсности выпрямленного напряжения неизбежно связано с усложнением трансформаторов и технологии изготовления, удельных расходов материалов и увеличением материальных затрат при изготовлении преобразователя. С увеличением фазности преобразования, переходные режимы улучшаются, однако построение преобразователей с 30, 36 и более кратной частотой выпрямленного напряжения влечёт увеличение количества элементов и, как следствие, существенное усложнение схемы[39]. Оптимизация числа вторичных фаз, влияющего на типовую мощность, является существенным инструментом достижения наилучших массогабаритных показателей преобразователя[54-55,]. В [54] отмечено, что оптимальные показатели качества использования трансформаторного оборудования достигаются при трехфазном исполнении преобразователя, как первичной, так и вторичной его систем. Закономерность, выявленная при оптимизации числа вторичных фаз трансформатора

выпрямителя, отражена, например, в [54] в виде оптимизационного графика (рисунок 1.5). Число первичных фаз трансформаторов выпрямителей определено существующим их набором в промышленной сети, т.е. равно одной, двум или трем фазам. В [55] обоснованно, что число вторичных фаз, полученных на основе трех исходных, может быть расширено за счет комбинации напряжений вторичных фазных обмоток трансформатора и даже быть не кратным трем. В соответствии с соотношениями, вывод которых приведен в [55], полная мощность вторичных обмоток многофазного трансформатора в относительных единицах при числе симметричных по исполнению одно обмоточных вторичных фаз  $m_2$  где  $q = 1$  для однополупериодных выпрямителей;  $q = 2$  - для двухполупериодных:

$$S_2^* = \frac{\pi}{(\sqrt{2})^q \cdot \sqrt{m_2} \cdot \sin \frac{\pi}{m_2}}. \quad (1.2)$$

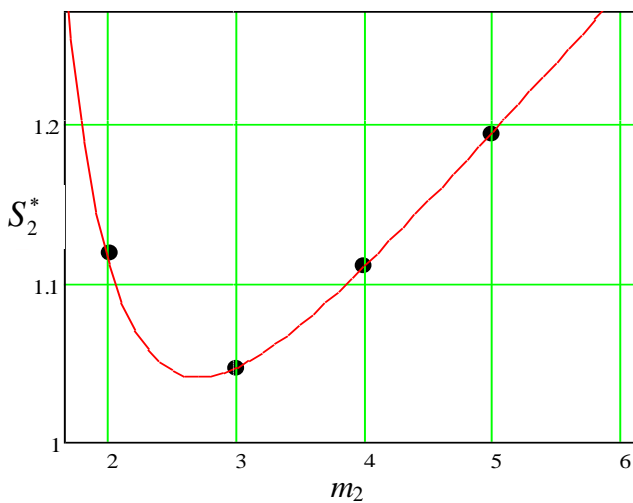


Рисунок.1.5 – Кривая оптимизации числа фаз  $m_2$

Эта зависимость с точностью до множителя  $\sqrt{2}$  представлена одним графиком для  $q = 2$ , приведенным на рисунке 1.5, где  $m_2$  условно принята непрерывной переменной. Учитывая известное преобладание в кривой графика типовой мощности трансформатора  $S_T$  «изобразительного» веса  $S_2^*$  над полной мощностью первичных обмоток  $S_1^*$ ,

оптимальное число фаз, определенное по мощности вторичных обмоток, оказалось равным трем (с учетом дискретности графика). При  $m_2 = 3$  во вторичных фазных обмотках трансформатора протекают токи, определенные в [54] как оптимальные по длительности:  $2\pi/3$  рад при однополупериодной схеме выпрямления (трехпульсной) и, соответственно,  $4\pi/3$  рад при двухполупериодной (шестипульсной) с трехфазным мостом. Исходя из критериев качества выпрямленного напряжения и первичного тока, число вторичных фаз необходимо увеличивать. Как отмечено в [55], увеличение

числа фаз за счет комбинаций построения вторичных фазных обмоток приводит к возрастанию типовой мощности трансформатора. Следует уточнить, что данное утверждение справедливо для выпрямителей трехфазного тока, причем начиная с числа пульсаций  $p > 3$  ( $m_2 = 3$ ) для однополупериодных схем и с числа пульсаций  $p > 12$  ( $m_2 = 6$ ) - для двухполупериодных схем с несимметричной вторичной системой.

Высокий показатель  $S_2^*$  базовой «оптимальной» трехфазной схемы предопределил её использование для агрегирования более сложных многофазных схем (рисунок 1.6). В частности, 12-ти пульсовый мостовой выпрямитель строят на двух шестипульсных выпрямителях с трехфазными мостами, первичные (вторичные) трехфазные обмотки трансформаторов (трансформатора) которых создают фазовый сдвиг, обеспечивающий эквивалентное 12-ти фазное преобразование.

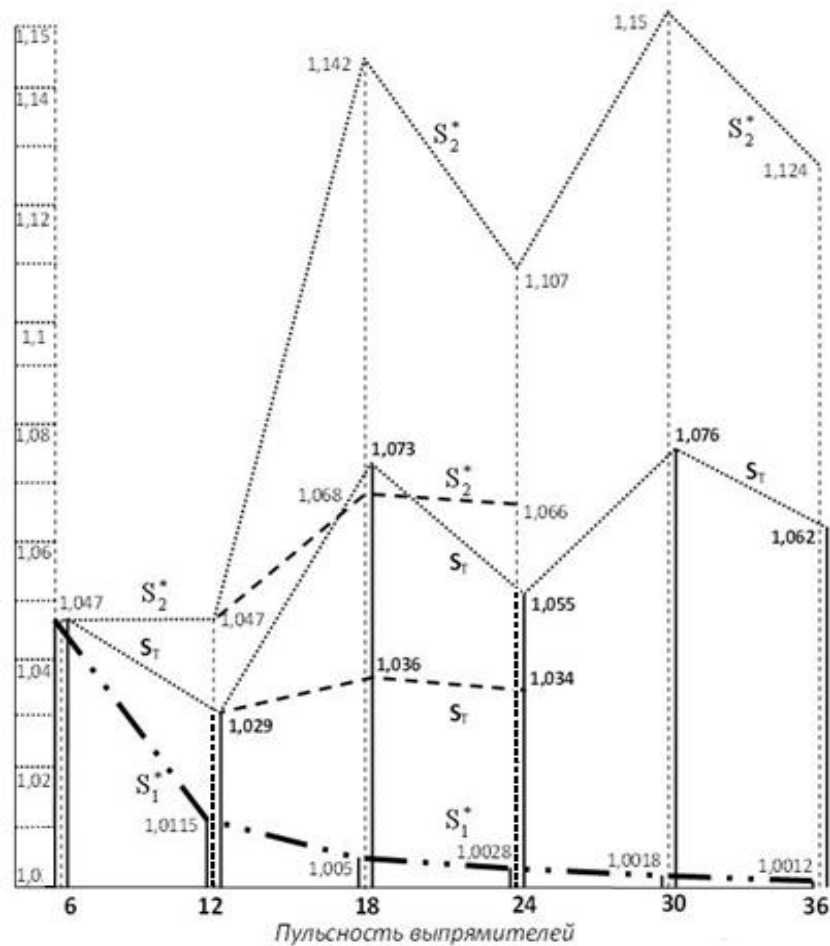


Рисунок.1.6. – Мощности трехфазного многообмоточного трансформатора

В отличие от качественной оценки  $S_2$ , приведенной на рисунке 1.5, на графиках рисунка 1.6 показаны результаты, полученные для конкретных применений. При  $m_2 = 3$  (пульсность  $p = 6$ ) полные мощности первичных и вторичных обмоток равны, а, соответственно, им равна и типовая мощность трансформатора. При  $m_2 = 6$  получено 12-ти пульсаций, так как шестифазная система вторичных напряжений не симметричная (как рассматриваемая для кривой на рисунок 1.5), а веерная.

Так как две трехфазные системы, сдвинутые между собой на  $30^\circ$  и составляющие общую шестифазную, обычно выполняются на основе звезды и треугольника, т.е. эквивалентных в электрическом понимании топологических фигурах, полная мощность каждой из них составляет половину от  $S_2 = 1,047$ .

Поэтому показатель остается таким же, как и при индивидуальной трехфазной системе. Полная же мощность первичных обмоток, определяемая при однотономатормном исполнении по простой формуле:

$$S_1^* = \frac{1}{\frac{p}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{p}}, \quad (1.3)$$

постоянно уменьшается (линия с двумя точками между пунктирами на рисунке 1.6). Этим и объясняется более высокий показатель использования трансформаторного оборудования ( $S_T^* = 1,029$ ) при 12-ти пульсовой схеме, чем при 6-ти пульсовой схеме. При дальнейшем увеличении числа фаз «льготы» по  $S_2$  исчезают, так как третьей, четвертой, и т.д. вторичной обмотки, эквивалентной звезде или треугольнику, т.е. фигуры, полностью строящейся по точкам Штейнера, уже не получить. При  $m_2 = 9$  вторичные системы для 18-ти пульсового выпрямителя можно строить как по симметричной девятифазной схеме, так и по веерной. Во всех случаях действуют закономерности, подобные [55]. Возникает вопрос, почему при нечетном числе вторичных фаз ( $m_2 = 3, 9, 15, \dots$ ) показатели  $S_2$  резко ухудшаются, особенно при выполнении обмоток зигзагами. Ответ на этот вопрос, в первую очередь, связан с тем, что при четных  $m_2$  все преобразователи агрегированы из наиболее оптимальных 12-ти пульсовых схем (24-, 36-, ... выпрямители), а при нечетных только из 6-ти пульсных,

причем с углами топологии, не способствующими оптимизации по точкам Штейнера (например, в 18-ти пульсовом выпрямителе сдвиг систем  $20^0$ , в 30-ти пульсовом -  $12^0$ ).

Для сравнения рассмотрим графики мощностей трансформаторов Скотта [55], построенные для одного из лучших по расчетным показателям семейств выпрямителей двухфазного ортогонального напряжения (рисунок 1.7).

Ожидать от применения таких выпрямителей каких-либо ощутимых преимуществ, за исключением возможности применения двух однофазных трансформаторов, нет смысла, и это видно даже по относительно низким показателям типовой мощности, не говоря о высокой параметрической асимметрии, сложности выполнения обмоток и т.п. Но, в данном случае, необходимо обратить внимание на плавность изменения  $S_2$ , причем уменьшающейся при увеличении фазности. Это объясняется тем, что в численный ряд величин  $m_2$  по всей линейке р-пульсных «ортогональных» выпрямителей входят только четные числа, обеспечивающие равномерно нарастающую длину обмоток, оптимальную для каждой фазности по собственным «точкам Штейнера».

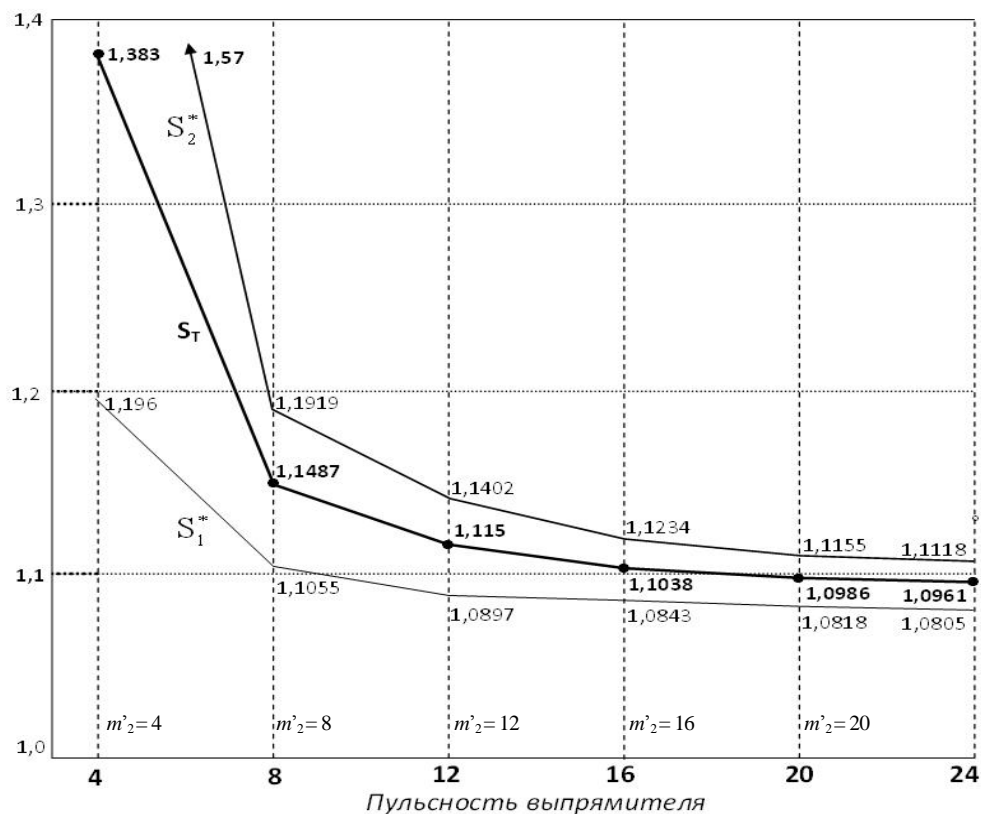


Рисунок.1.7 – Мощности трансформаторов Скотта

Фактически во всех таких выпрямителях ТПЧФ имеет  $m_2 = 2$ , а из ортогональных отрезков ступеньками «набирается» необходимая по фазности преобразования лучевая система  $m'_2$ . «Ортогональные» выпрямители «нарушают» также закономерность увеличения  $S_2$  и  $S_T$  при увеличении  $m_2$ , присущую идеальным многолучевым симметричным системам (рисунок 1.5) и системам, использующим в качестве первичного трехфазное напряжение (рисунок 1.6). Это лишний раз подтверждает вывод о том, что снижение использования обмоток по току при увеличении  $m_2$  не связано напрямую с повышением  $S_2$ .

Поэтому перспективным направлением исследования многопульсовой схемотехники являются 24-х пульсовые выпрямители построенные на основе трехфазной системы напряжений, которые из проведенного выше исследования обладают наилучшими массогабаритными показателями.

Необходимо отметить, что основными препятствиями, ограничивающими внедрение выпрямителей с числом пульсаций выпрямленного напряжения более двенадцати являются проблемы, связанные со сложностью разработки эффективных методик инженерных расчетов трансформаторного оборудования, оптимально учитывающих при размещении ВО в окне магнитопровода влияние сопротивлений рассеяния, обеспечивающих симметрирование индуктивных сопротивлений и минимальные потери в вентильных обмотках [18, 56]; соответственно, возникают технологические сложности при изготовлении трансформаторов с увеличенным числом обмоток [34]. Существенны проблемы, связанные с несимметрией питающих напряжений, когда даже при допустимой несимметрии в 0,2 % [57] эффективность преобразования при повышенной фазности преобразователя существенно снижается [18], а также проблемы, связанные с несинусоидальностью сетевых токов [58].

Немаловажным отрицательным фактором, является проблема, связанная с конструктивной несимметрией ВО, усложняющаяся при изготовлении выпрямителей, собранных по последовательным схемам. Поэтому, учитывая перспективность повышения числа пульсаций до 24-х, следует признать наиболее оптимальным применение на ТВА ТП двухкаскадных 12-ти пульсовых кольцевых выпрямителей



последовательного или параллельного типа но с числом выпрямительных секций преобразования не более двух.

Однотрансформаторный многофазный выпрямитель круговой топологии, вентильные обмотки которого выполнены по известным схемам формируют четыре симметричные трехфазные системы напряжений, сдвинутые друг относительно друга на 15 эл. градусов и соединены с трёхфазными вентильными мостами (рисунок 1.8) [45].

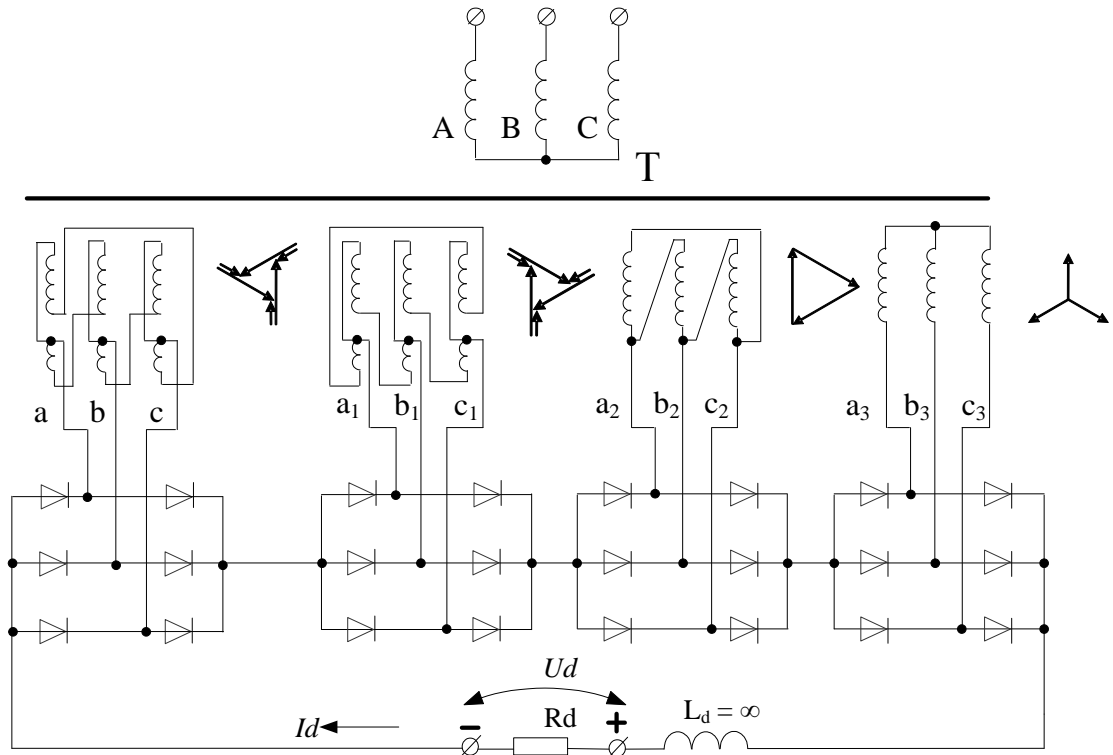


Рисунок.1.8 – 24-х пульсовый мостовой ТВА последовательно типа работающий на одном преобразовательном трансформаторе

Вентильные мосты между собой соединены последовательно и на выходе формируют 24-х-пульсовое выпрямленное напряжение при этом типовая мощность трансформатора ( $S_T = 1,278 P_d$ ) значительна и большие потери в вентильной схеме так, как в цепи выпрямленного тока шесть вентилей.

Большой эффект достигается при использовании в 24-х пульсовом мостовом ТВА с четырьмя симметричными трехфазными системами напряжений трёхфазные вентильные мосты которых соединены последовательно-параллельно (рисунок 1.9) [45].

Последовательное соединение двух пар трехфазных мостовых схем формируют две 12-ти пульсовых выпрямленные секции (ВС) с фазовым сдвигом между собой в  $30^0$  эл. град.

УР включенный в анодные цепи указанных ВС обеспечивает их параллельную работу и формирует 24-х пульсовое выпрямленное напряжение. Благодаря УР в каждый момент времени в схеме происходит уравнивание напряжений обеих ВС, обеспечивая возможность работы на общую нагрузку.

Такое схмотехническое решение позволило снизить потери в вентилях с 6-ти до 4-х в цепи выпрямленного тока. Применение УР позволило снизить типовую мощность ( $S_T$ ) с  $1,278 P_d$  до  $1,129 P_d$ , но при этом появились активные потери на нем. Такое схмотехническое реализовано и работает на тяговой подстанции ЗСЖД г.Омск, в составе модернизированного преобразовательного трансформатора ТМРУ – 16000/10 и вентиляционной конструкций типа ТПЕД-3150-3,3К-У1 [45]. Как следует из (рисунка 1.9) схема содержит трехфазный трансформатор, система ВО которых формирует две симметричные шестифазные системы напряжений.

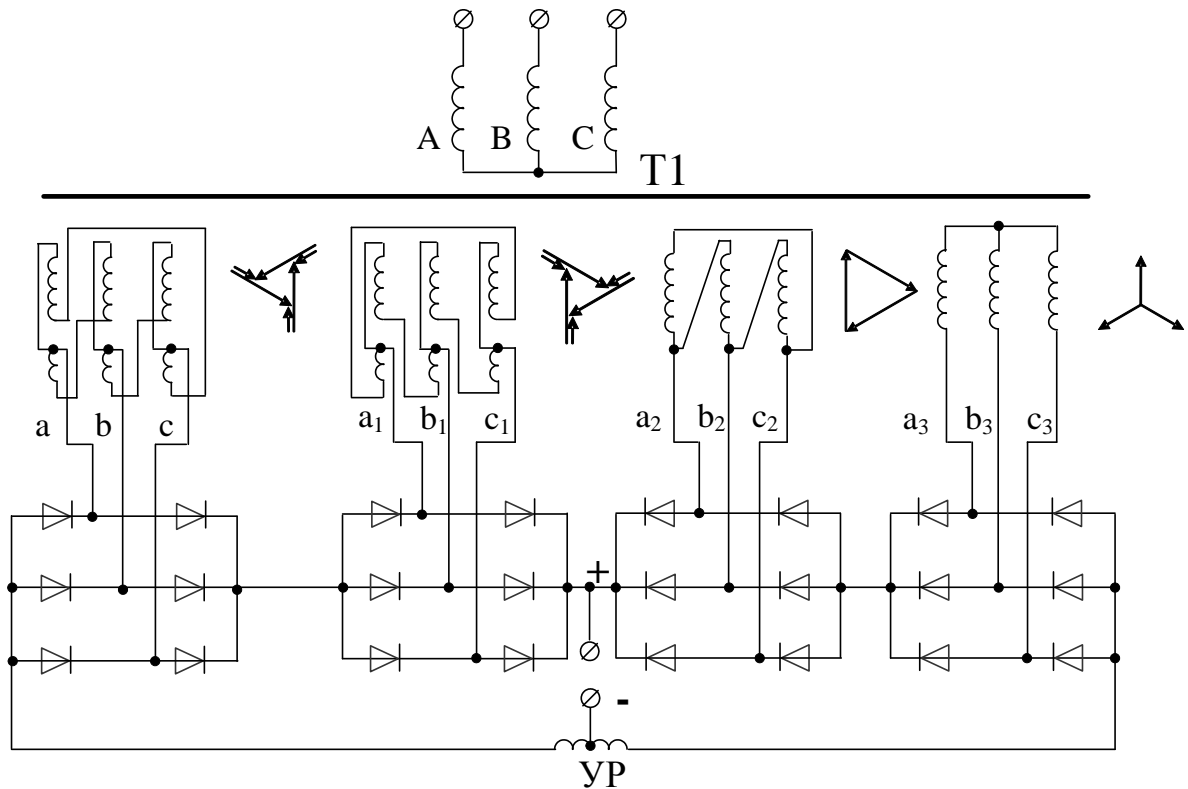


Рисунок 1.9 – Однотрансформаторный 24-х пульсовый ТВА мостовой последовательно-параллельно типа.

Первая система \образована за счет применения обмоток, соединенных звездой и треугольником, а вторая система – за счет обмоток, соединенных по схемам замкнутых скользящих треугольников. Для улучшения технико-экономических показателей выпрямителя ВС объединены УР, что обеспечивает лучшее использование вентильных обмоток и снижает, тем самым, установленную мощность трансформаторного оборудования.

Многочисленные расчёты однотрансформаторных 24-х пульсовых ТВА круговой топологии, имеющих разнообразные схемы соединения сетевых и вентильных обмоток и последовательно-параллельное структурирование секций, показали, что без уравнительных реакторов типовые мощности трансформаторов относительно велики ( $1,23 \dots 1,28 P_d$ ). Даже известные каскадные преобразователи на основе классических шестипульсных мостовых схем имеют те или иные недостатки [25, 45 ], особенно выраженные при работе с уравнительными реакторами. В связи с этим актуальны вопросы поиска, разработки и анализа схемных решений МП, не имеющих УР и расширяющих область применения преобразователя.

Поэтому актуальна задача исследования малоизученного класса выпрямителей, построенных по квазисекторным [59-60] шестифазным топологиям не имеющих УР и обеспечивающие относительно небольшие типовые мощности трансформаторов; выявление их достоинств и недостатков, дальнейшая взвешенная оценка которых определит перспективность практического применения. Для 24-х пульсного выпрямителя, отображенного на рисунке . 1.10, характерно то, что форма кривой выпрямленного напряжения на выходе каждого моста не соответствует форме канонической 12-пульсной кривой.

При соединении двух выпрямительных секций последовательно на общих выходах выпрямителя формируется 24 пульсовое выпрямленное напряжение. Автором [59] определена типовая мощность трансформатора выпрямителя, равная  $S_T^* = 1,165$ . На основе полученных топологических размеров ВО шестифазных звезд, можно рассчитать размеры вторичных обмоток, которые можно получить с применением других схемных решений к примеру «скользящих треугольников», «правильных и неправильных шестиугольников» и т.д.

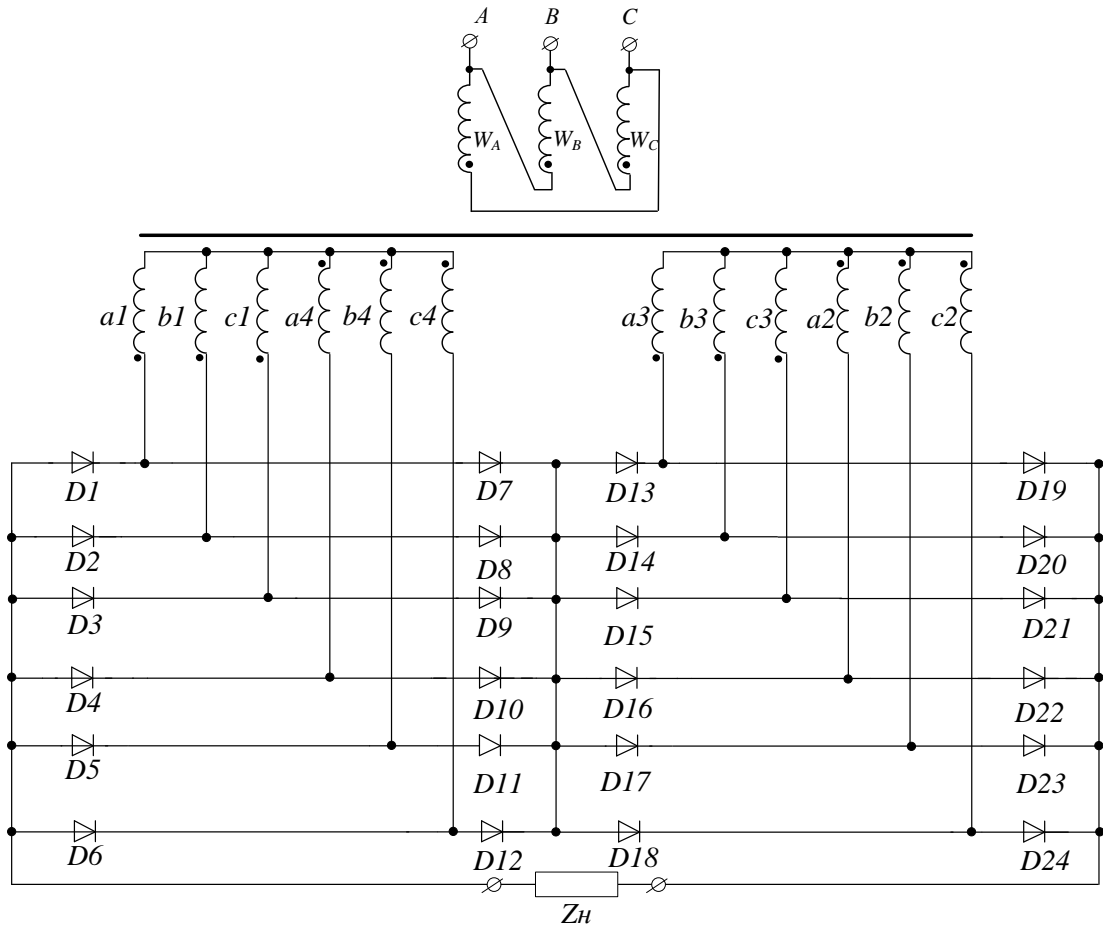


Рисунок 1.10 – 24-х пульсовый ТВА А.Г. Аслан-Заде

На (рисунке.1.11, а) показаны фрагменты временных диаграмм выпрямленных напряжений в секциях и на выходных зажимах 24-х пульсового выпрямителя разработанного Аслан-заде А.Г. Часть развернутой векторной диаграммы на рисунке 1.11, б, поясняет принцип формирования выпрямляемых результирующих напряжений. На рисунке 1.11, в, приведены амплитудно фазовые портреты (АФП) вентильных обмоток представляющие собой замкнуто и разомкнутого типов, для них указаны (типовые мощности трансформаторного оборудования, относительные размеры, а также длительности работы фазных обмоток. При смене схем обмоток необходимо сохранять положения рабочих точек на АФП. Использование других схемных построений вентильных обмоток может вызвать уменьшение типовой мощности трансформатора и вызвать влияние потоков подмагничивания. Такие решения по замене схемных решений вентильных обмоток, приводит к усложнению обмоток. При чем для обмоток шестифазной звезды 2–3 (рисунк 1.11, в) соотношения размеров лучей малой звезды и лучей большой звезды, соответствует

0,8587, о.е.. Оно определено с помощью геометрических построений, предложенных в [59]. Для второй шестифазной звезды 1–4 соответствующее отношение равно 0,614.

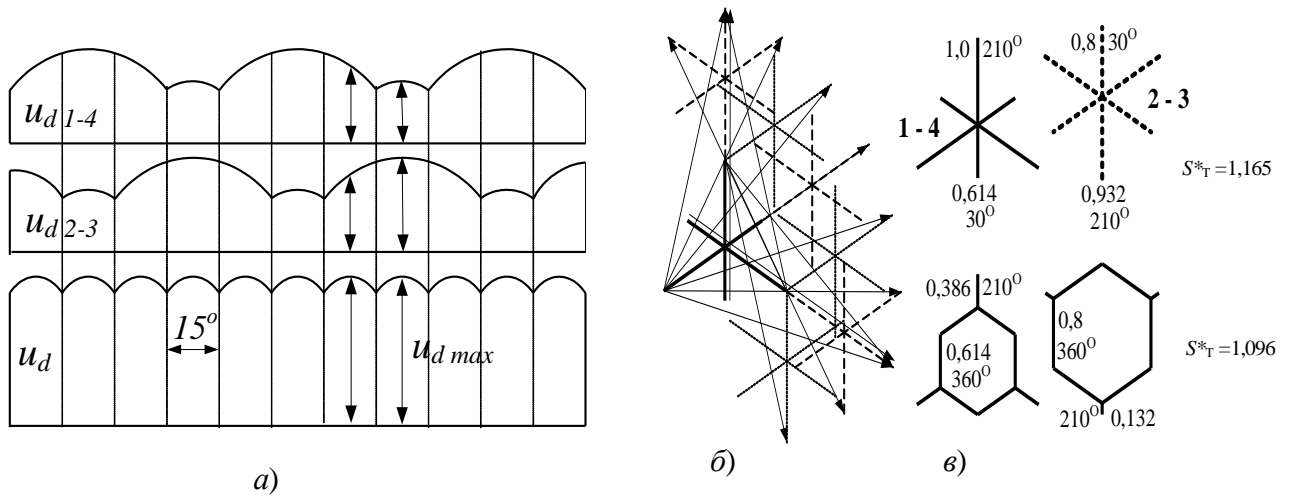


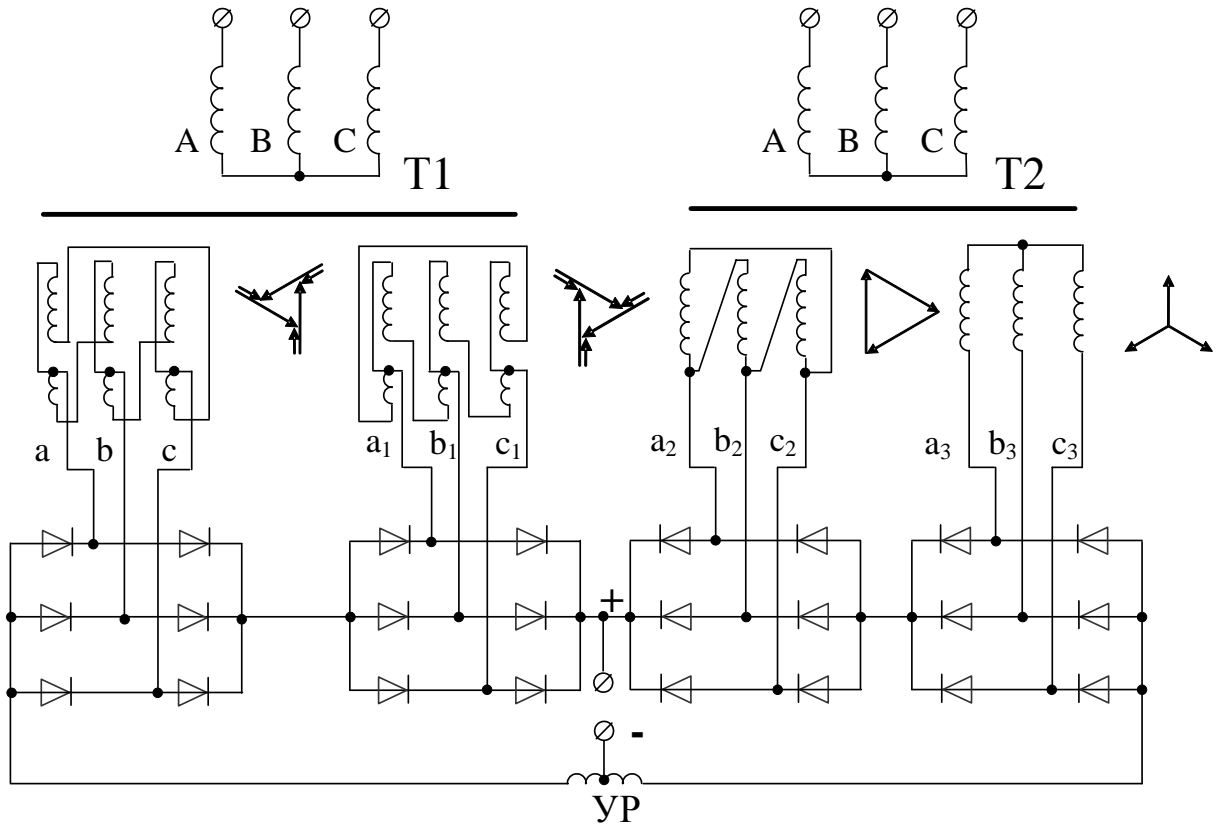
Рис.1.11 – Диаграммы напряжений, векторные диаграммы и АФП ВО трансформатора 24-х пульсового выпрямителя

Анализ проведенный выше показывает, что совмещение всех положительных свойств многофазного выпрямителей в однотономатрном решении без применения УР недостижимо.

Использование в ТВА для увеличения фазности преобразования нескольких трансформаторов, требует применения разнообразных схем не только фазных но и сетевых обмоток, которые обеспечивают необходимые фазовые сдвиги между системами, а также использованием специальных фазопоротных трансформаторов, которые вызывают возрастание типовых мощностей трансформаторного оборудования. Проведенный анализ 24-х пульсовых выпрямителей построенных на базе 2, 3 и 4-х трансформаторах показывает, что эффективное использование трансформаторного оборудования достигается при количестве трансформаторов равное двум.

На рисунке1.12 приведена 24-х пульсовый ТВА выполненный на двух трансформаторах обеспечивающий симметрию СО, фазовый сдвиг между шестифазными системами напряжений трансформаторов  $30^0$  эл. град., создается соединением ВО как и в однотономатрном выпрямителе (первая система - соединением обмоток звезда и треугольник), а вторая система – соединением обмоток по схемам замкнутых скользящих треугольников). Что приводит к такой же

несимметрией ВО как и в однотрансформаторных выпрямителях рассмотренных выше, по этому без применения УР типовая мощность трансформатора(ов) возрастает:  $S_T = 1,278 P_d$ .



Рисунке 1.12 – 24-х пульсовый ТВА мостовой последовательно-параллельного типа на двух преобразовательных трансформаторах с УР

Применение УР снижает  $S_T = 1.055P_d$  трансформаторного оборудования, но при этом появляется типовая мощность УР которая приводит к увеличению  $S_T = 1.129P_d$ . Также УР вносит в цепь выпрямленного тока активные потери.

Другой подход для синтеза 24-х пульсовой схемы ТВА на двух трансформаторах с использованием фазового сдвига между шестифазными системами напряжений трансформаторов  $30^0$  эл. град., полученным при соединении сетевых обмоток двух трансформаторов в звезду и треугольник, представлен на рисунке 1.13 [61].

Обращает на себя внимание тот факт, что «технология» удвоения числа пульсаций не связана с фазовым сдвигом 15 эл. град., как это принято при

агрегировании двух 12-ти пульсовых мостовых схем в 24-х пульсовую. В данном случае используется метод «амплитудно-модуляционный».

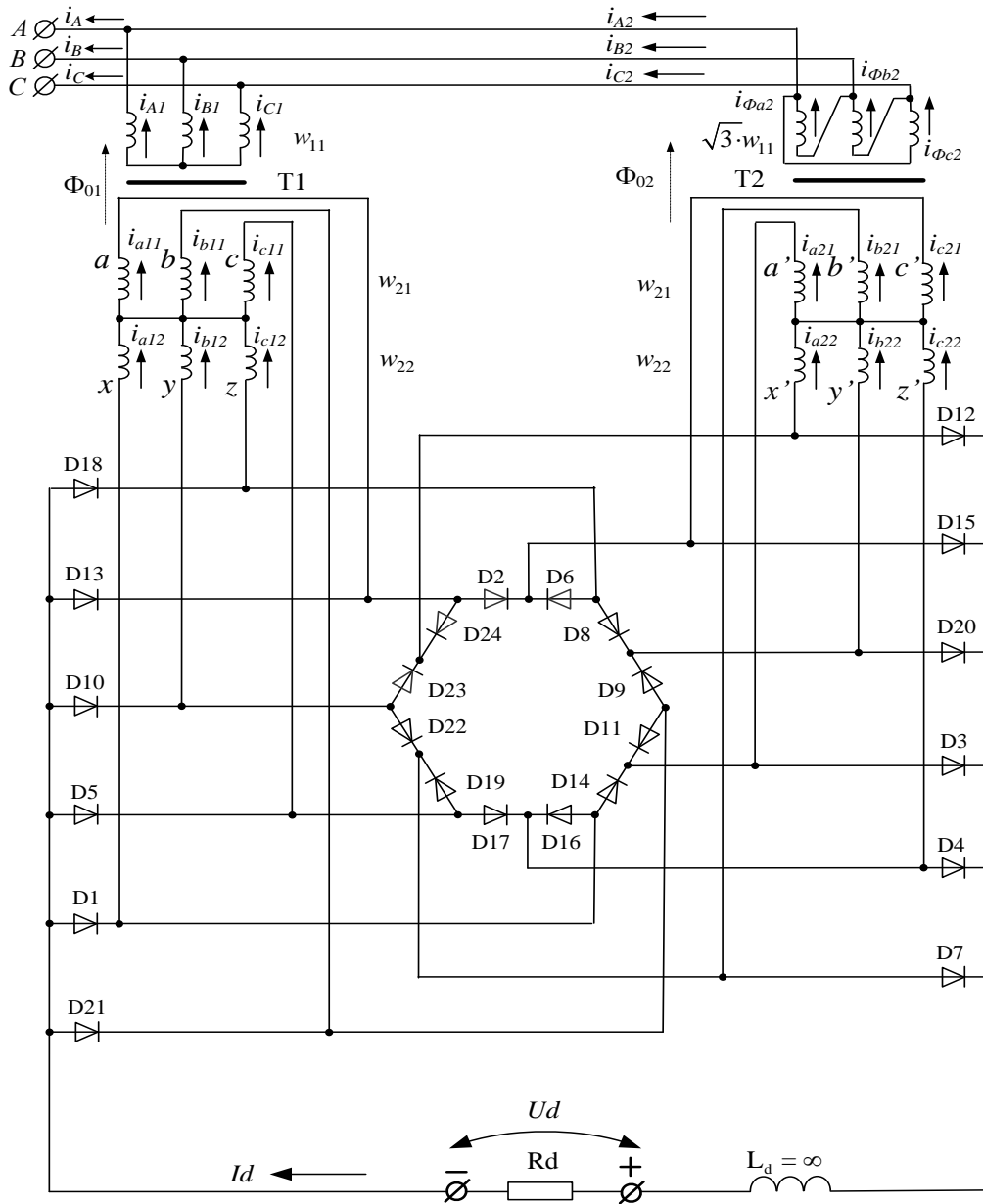


Рисунок. 1.13 – Принципиальная схема двухтрансформаторного 24-х пульсового ТВА с шестифазными симметричными звездами

Результаты анализа позволили определить суммарную типовую мощность трансформаторов с учётом компенсации  $\Phi_{0j}$ :

$$S_T^* = \frac{S_1^* + S_2^*}{2} = \frac{1,2028 + 1,274}{2} = 1,238$$

Такая большая типовая мощность связана с остаточной намагниченностью трансформаторов которая присуща для незамкнутых ВО «звезда» и значительной

несимметрией первичных обмоток (ПО). Необходимо отметить, что в рассматриваемом двухкаскадном 24-х пульсовом выпрямителе ток нагрузки обтекает всего три вентильных плеча. Следующее схмотехническое решение (рисунок 1.14) построено на основе симметрии ПО и ВО [62, 63, 64].

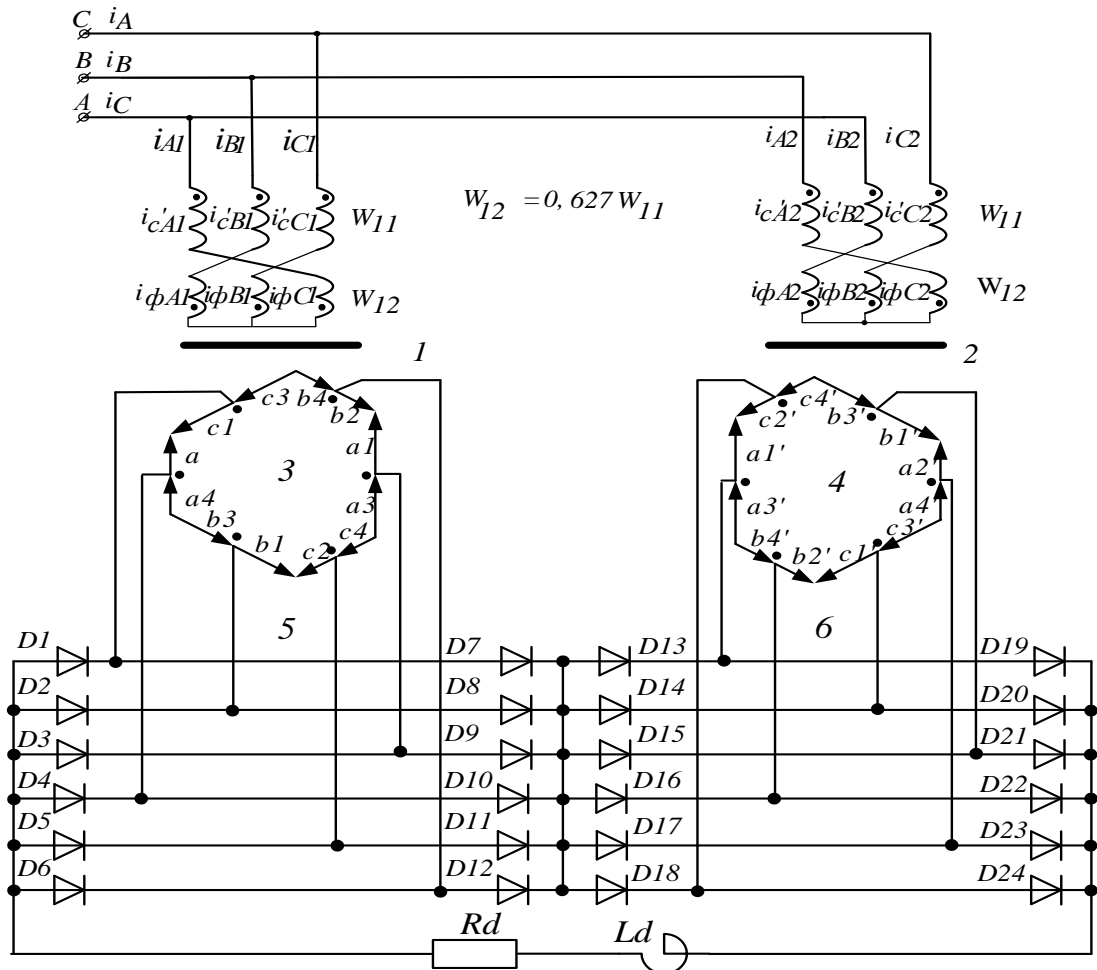


Рисунок. 1.14 – Схема двухтрансформаторного 24-х пульсового ТВА с ВО соединенными в полуправильные шестиугольники

Симметрия ВО достигается использованием замкнутым построением обмоток, представляющая фигуру полуправильных шестиугольников. При этом с уменьшением типовой мощности трансформаторов увеличивается число частей вторичных обмоток в каждом трансформаторе в полтора – два раза. Вентильная часть выполнена по схеме двух шестифазных мостов, соединённых последовательно или же параллельно, но с применением уравнивающего реактора. Кроме того, для снижения мощности потерь в вентилях при последовательном структурировании выпрямителя вентильная часть может быть выполнена по кольцевой схеме. Диоды вентильных



плеч мостов, соединённых с большими сторонами шестиугольника, имеют угол проводимости 45 эл. град., а диоды плеч, соединённых с малыми сторонами – 75 эл. град. Обратные напряжения для всех вентилях выпрямителя последовательного типа  $U_{\text{ОБР МАКС}} = 0,512 U_{\text{д0}}$ . Типовая мощность трансформаторного оборудования указанного схемотехнического решения составляет  $S_T = (S_{T(1)} + S_{T(2)})/2 = 1,1394P_d$ . В схемном решении используется нестандартный способ формирования кривой выпрямленного напряжения. Выходное напряжение каждой из выпрямительных секций (ВС) не является каноническим 12-пульсовым. Для получения 24-х пульсового выпрямленного напряжения с каноническими пульсациями ВС имеют фазовый сдвиг 30 эл. град., увеличивает типовую мощность ПО в сравнении с решениями со сдвигом в 15<sup>0</sup> эл. град. При этом каскады схемы могут быть соединены параллельно, но обязательно с применением УР, так как без уравнительного реактора режим преобразования станет 12-фазным из-за «поглощения» малых пульсаций большими при параллельном их наложении. Схема может быть использована в перспективных системах электроснабжения постоянным током с продольными линиями 12 – 36 кВ [65, 66], а также в высоковольтных системах с ещё большим напряжением.

Собственный недостаток связан с относительно большим различием в числах витков вторичных обмоток, что затрудняет обеспечение равенства электромагнитных условий при их размещении на стержне магнитопровода. В соответствии с этим, данный преобразователь имеет пониженное качество преобразования в определенных поддиапазонах значений мощностей и (или) напряжений.

Полную идентичность секций, особо востребованную в мощных преобразователях параллельного типа, можно обеспечить, например, при выполнении первичных обмоток зигзагами [64] или скользящими треугольниками.

Определенный опыт, накопленный в процессе эксплуатации 24-х пульсового мостового ТВА на тяговой подстанции Омск, и результатов анализа и синтеза новых схемных решений многопульсовых выпрямителей на основе кольцевых вентильных схем, разрабатываемых в НГТУ, дают основание утверждать, что наиболее перспективными являются схемотехнические решения построенные по двух трансформаторной топологии с кольцевыми схемами включения вентилях [67-69].

В подтверждение этого предложены новые перспективные варианты схемотехнических решений 24-х пульсовых ТВА для ТП постоянного тока, обеспечивающие повышение стабилизационных свойств выпрямленного напряжения и снижение энергопотребления. Оригинальность предлагаемых схемных решений защищена патентами РФ № 144509; 144525; 151148; 175986; 176682.

### **Выводы по главе 1**

В результате аналитических исследований и предлагаемых различными авторами схемотехнических решений 24-х пульсовых выпрямителей можно сделать следующие выводы:

1. Основной причиной снижения энергоэффективности ТВА ТП постоянного тока является уменьшение выпрямленного напряжения при увеличении тока нагрузки в тяговой сети до максимальных значений.
2. Одним из рациональных путей повышения энергоэффективности ТВА это применение многофазных решений позволяющие улучшить стабилизационные свойства выпрямленного напряжения и уменьшить потери электроэнергии.
3. Определено, что с увеличением фазности МВ до 30, 36, 42 и 48 кратной частотой выпрямленного напряжения усложняет технологию изготовления ВО и как следствие существенно усложняет схемотехнические решения, что не дает возможность предложить их для применения на практике.
4. Анализ суммарных мощностей вторичных обмоток для многопульсовых ТПЧФ с решением задачи Штейнера, показывает что трехфазная система напряжений обладает преимуществом над любой другой системой, при этом высокий показатель использования трансформаторного оборудования при пульсациях более 12-ти отмечено для 24-х пульсовых схемных решений.
5. В результате патентного поиска найдены схемотехнические решения ТВА с 24-х кратной пульсацией выпрямленного напряжения, позволяющие снизить потери активной мощности в трансформаторном оборудовании и вентильной конструкции и повысить стабилизационные свойства выпрямленного напряжения.

## Глава 2 АНАЛИЗ ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХ ПУЛЬСОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ МОДУЛЬНОГО ТИПА С КОЛЬЦЕВЫМИ ВЕНТИЛЬНЫМИ СХЕМАМИ

### 2.1 Фазо-аналитическая методика определения углов проводимости вентилей комбинированных многопульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов

В настоящем исследовании предпринята попытка определения закономерностей образования углов проводимости вентилей и их обобщение для получения более универсальной и простой методики при исследовании комбинированных многопульсовых схем выпрямления. Угол проводимости вентиля является важным параметром выпрямителя и характеризует степень его использования по времени. Продолжительность непрерывной работы каждого вентиля определяется углом проводимости вентиля (УПВ), который в общем случае обозначается буквой  $\lambda$  и определяется выражением  $\lambda = 2\pi/m$  где  $m$  – число пульсаций за период. Которое справедливо для таких известных трехфазных выпрямителей как Миткевича В.Ф.; Ларионова А.Н.; Вологодина В.Д. и других. Дальнейшее увеличение пульсности выпрямителей происходит за счет усложнения схемных решений например Игольникова Ю.С., Аслан-заде А.Г., Евдокимова С.А. и др. приводящие к изменению «анизотропии» УПВ. Анизотропия УПВ связана с тем, что в комбинированных многопульсовых выпрямителях вентили находятся в различных условиях из-за различий вентильных конструкций, особенностей построения выпрямительных каскадов, что приводит к изменению их углов проводимости, поэтому нет формулы предусматривающей все случаи построений схемных решений.

Определение УПВ многопульсовых комбинированных схемных решений проводимый с помощью существующего графо-аналитического метода [70], не дает развернутой и полной картины конкретного места нахождения вентилей их углов проводимости. Анализ сопровождается увеличением числа узлов и количества графов топологических моделей, это затрудняет и значительно усложняет процедуру определения УПВ, особенно при параллельном соединении выпрямительных секций.

Из выше изложенного следует, что в схемных решениях где имеется анизотропия УПВ необходима оперативная, наглядная и убедительная методика позволяющая определить как загружен конкретно каждый вентиль для рационального подбора силовых электронных приборов.

Существует авторская методика которая значительно упрощает поиск УПВ, приведя устройство к фазо-аналитическому портрету на фазовой плоскости (ФП) где становится понятна роль каждого элемента и принцип действия. Методика основана на определенном алгоритме построения топологической структуры ВО и их вентилях на ФП. Для получения фазового портрета вентиляльной схемы выпрямителя необходимо, разместить топологическую структуру схемного решения на ФП. Для решения этой задачи применим метод аппроксимации для топологических узлов – точек схемных решений выпрямителей преобразуя их в «кольцо» на котором электрический потенциал исходной точки сохраняется для всех точек кольца – потенциальное кольцо (ПК). Такое решение дает возможность элементы схем расположенные до УТ разместить внутри ПК, а элементы находящиеся за УТ расположить снаружи ПК. Разместив ПК на ФП с привязкой к ней точек соединения ВО, векторов напряжений и вентилях в соответствии с их фазовыми углами, получаем вентиляльно-фазовый портрет (ВФП).

Для построения ВФП необходимо принять следующие допущения (начальные условия):

- узловые точки схемных решений заменяем на потенциальные кольца (ПК);
- на ПК размещаем схемные решения ВО и вентилях в соответствии с их фазовым портретом;
- направление движения тока в ПК только по часовой стрелке;
- для упрощения отображения соединения вентиляльных обмоток «звезда», «скользящий треугольник», «зигзаг» следует заменить их на «треугольник», а их фазовые различия учитываем при размещении на ФП придав им фазовый сдвиг в виде поворота «треугольника» на соответствующий угол;
- обозначения точек соединений, ВО и вентилях проводится от центра и начала ФП по часовой стрелке;

-при построении многопульсовых схемных решений на основе параллельного соединения независимых выпрямительных секций (модулей) необходима их графическая дифференциация (например выделить другим цветом).

Для иллюстрации методики проведем анализ схемных решений, которые являются базовыми при синтезе многопульсовых выпрямителей:

– Шестипульсовая трехфазная мостовая схема выпрямления Ларионова (рисунок 2.1, а) представляющая собой совокупность двух трехфазных нулевых схем прямой и обратной включенных последовательно.

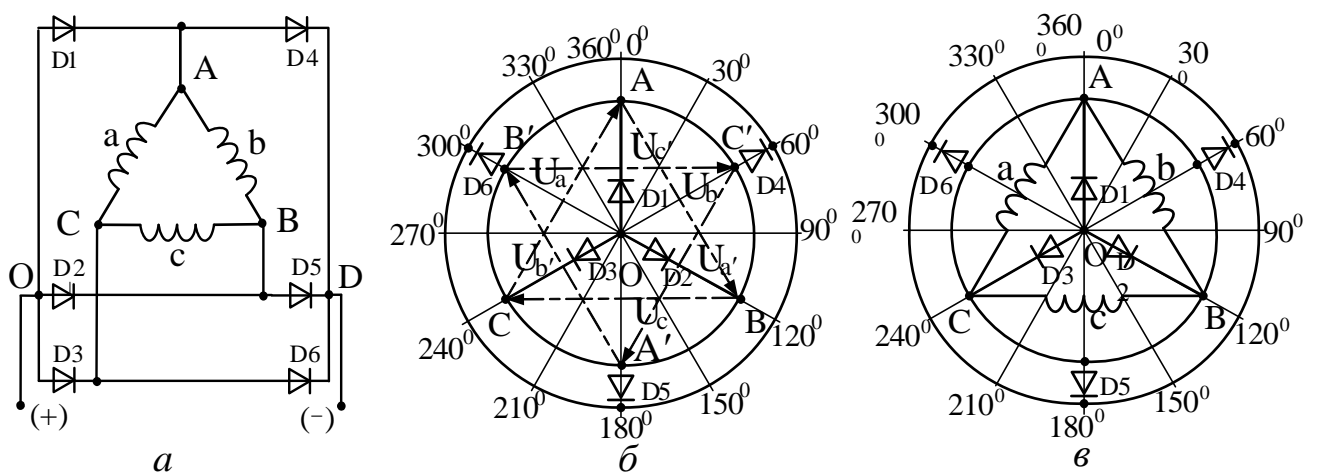


Рисунок 2.1 – Трехфазная схема выпрямления Ларионова: а – электрическая схема; б – ВФП с векторами напряжений; в – ВФП с ВО

С помощью ФАМ схемное решение трансформируем в ВФП (рисунке 2.1, б), для этого точка О на (рисунке 2, б) размещена в центре ФП, используя первое ПК для точек соединения векторов напряжений ВО (А, В, С), катодов вентилей D1, D2, D3 и анодов вентилей D4, D5, D6, а второе ПК для точек соединения катодов вентилей 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 углы проводимости составляют: D1  $\in$  ( $0^0$  до  $120^0$ ); D2  $\in$  ( $120^0$  до  $240^0$ ); D3  $\in$  ( $240^0$  до  $360^0$ ); D4  $\in$  ( $60^0$  до  $180^0$ ); D5  $\in$  ( $180^0$  до  $300^0$ ); D6  $\in$  ( $300^0$  до  $60^0$ ) таким образом у всех вентилей углы проводимости (УП) равны и составляют  $120^0$ эл. град.

– Шестипульсовый трехфазный нулевой выпрямитель Кюблера без УР показан на (рисунке 2.2, а). Выпрямитель состоит из двух трехфазных нулевых выпрямителей, работающих параллельно на общую нагрузку. Нулевые точки звезд связаны между собой со средней точкой  $O$ , которая является для нагрузочной цепи плюсом. Используется одно ПК (рисунок 2.2, б) на которой находятся точки  $A, B, C, A', B', C'$ , вентили  $D1, D2, D3, D4, D5, D6$  подключены катодами. Выпрямительные секции идентичны и имеют между собой фазовый сдвиг  $60^\circ$  эл. градусов. Из (рисунка 2.2, б) следует, что совместная работа выпрямителей происходит при условии совпадение углов

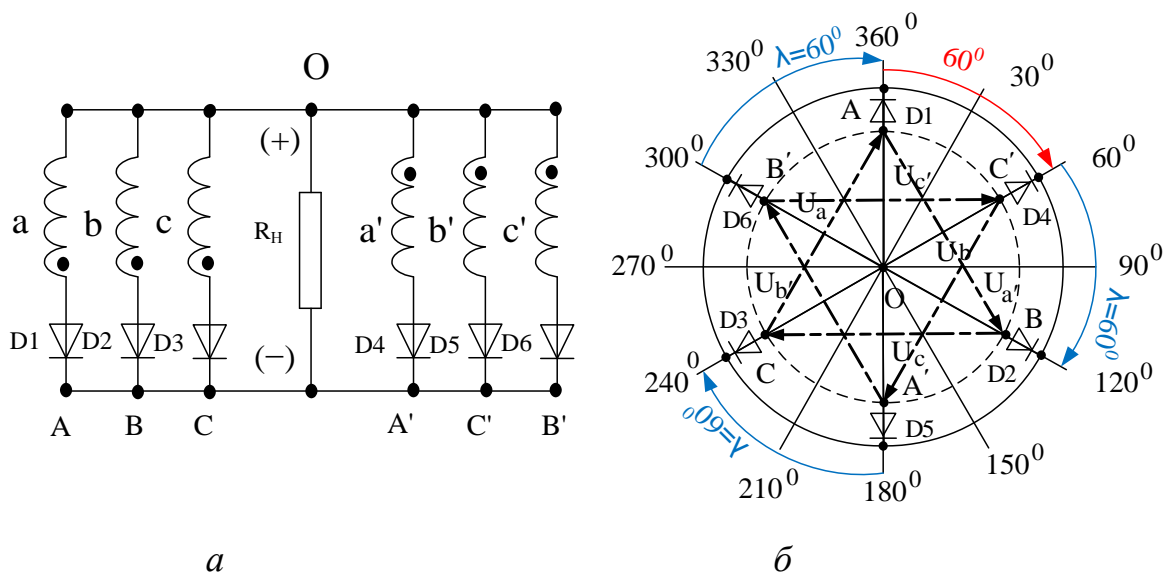
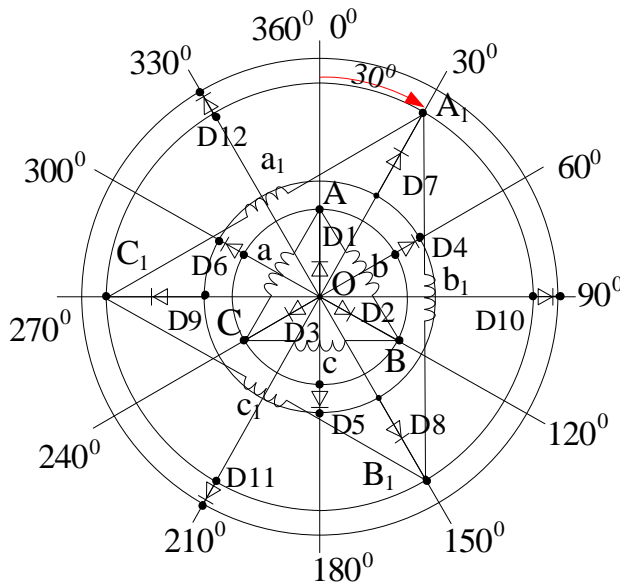


Рисунок 2.2 – Выпрямитель Кюблера без УР: *а* – электрическая схема, *б* – ВФП с векторами напряжений

проводимости соответствующих вентилях, они составляют: для  $D2$  и  $D4$   $\in (60^\circ \text{ до } 120^\circ)$ ;  $D3$  и  $D6$   $\in (180^\circ \text{ до } 240^\circ)$ ;  $D1$  и  $D6$   $\in (300^\circ \text{ до } 360^\circ)$ . Таким образом УПВ обоих выпрямительных секций сократились и составили  $60^\circ$  эл. градусов.

– ВФП выпрямителя 12-ти пульсового состоящего из последовательного соединения двух трехфазных мостовых выпрямителей Ларионова с фазовым сдвигом между ними  $30^\circ$  эл. град. представлен на (рисунке 2.3, а). Для получения ВФП трансформацию схемного решения необходимо произвести в следующей последовательности первую трехфазную схему размещаем как на (рисунке 2.1, в) в центре ФП и ориентируем относительно нулевого градуса. Вторая схема охватывает

первую с наружи и подключаем к ее внешнему ПК и придаем фазовый поворот относительно ФП на  $30^0$  эл. град. Как следует из полученного ВФП (рисунок 2.3, а) данное решение имеет возможность инвариантного чередования фаз ВО которые не влияют на формирование углов проводимости вентилей, также как фазовый сдвиг между выпрямителями не вызывал изменений и они составляют  $120^0$  эл. град. на всех вентилях, результаты исследований представлены в таблице на (рисунке 2.3, б).



№	Границы УПВ, эл. град.	УПВ, эл. град.
D1	$0^0 - 120^0$	$120^0$
D2	$120^0 - 240^0$	$120^0$
D3	$240^0 - 0^0$	$120^0$
D4	$60^0 - 180^0$	$120^0$
D5	$180^0 - 300^0$	$120^0$
D6	$300^0 - 90^0$	$120^0$
D7	$30^0 - 150^0$	$120^0$
D8	$150^0 - 270^0$	$120^0$
D9	$270^0 - 30^0$	$120^0$
D10	$90^0 - 210^0$	$120^0$
D11	$210^0 - 330^0$	$120^0$
D12	$330^0 - 90^0$	$120^0$

а

б

Рисунок 2.3 – Выпрямитель 12-ти пульсовый на основе последовательного соединения двух трехфазных мостовых выпрямителей Ларионова: а – ВФП выпрямителя; б – таблица УПВ.

– ВФП выпрямителя 12-ти пульсового состоящего из параллельного соединения двух трехфазных мостовых выпрямителей Ларионова с фазовым сдвигом между ними  $30^0$  эл. град. представлен на (рисунке 2.4, а). Для получения ВФП при трансформации схемного решения необходимо первую схему разместить также как на (рисунок 2.1) в центре ФП и ориентировать относительно нулевого градуса, а вторая схема размещается поверх первой с фазовым сдвигом  $30^0$  эл. град. для графической дифференциации выделим ее оранжевым цветом. При этом обе схемы имеют общие места соединений это центральная точка О и внешние ПК обеих схем объединены в одно. Анализ ВФП (рисунок 2.4, а) показывает, что данное решение как и при

последовательном соединении выпрямителей инвариантно к чередованию фаз ВО и не влияет на формирование углов проводимости вентиляей.

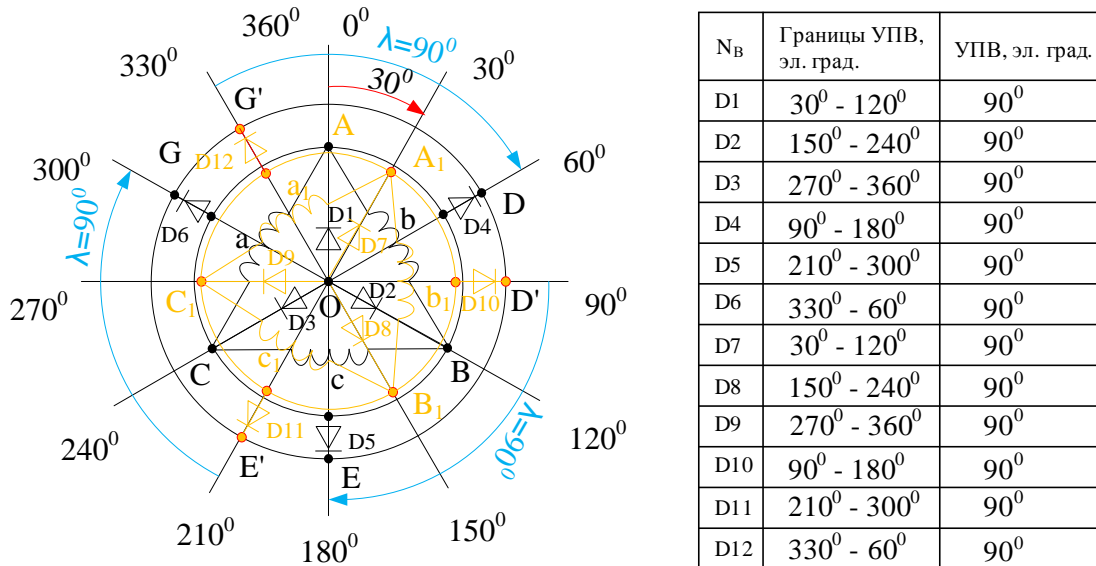


Рисунок 2.4 – 12-ти пульсовый выпрямитель на основе параллельного соединения двух трехфазных мостовых выпрямителей Ларионова: а – ВФП выпрямителя; б – таблица УПВ.

Фазовый сдвиг между выпрямителями вызывал уменьшение УПВ и они составляют 90° эл. град. на всех вентилях. Результаты исследований обобщены в таблице на (рисунке 2.3, б).

– ВФП 12-ти пульсового выпрямителя с кольцевой вентиляльной схемой представлен на (рисунке 2.5, а). Исследование ВФП доказывает невозможность инвариантного чередования фаз ВО, как в мостовых схемах, наглядно объясняя это закреплением особого включения между первым и вторым ПК вентиляей (D7, D4, D8, D5, D9, D6), которые образуют «кольцо». Это кольцо не только жестко определяет чередование фаз ВО но и определяет углы проводимости вентиляей кольца закрепленные точками подключения вентиляей между первым и вторым потенциальными кольцами. Например анод вентиля D7 подключен в точке А первого ПК лежащей на 0 градусе ФП, а катод подключен в точке А<sub>1</sub> второго ПК лежащего на



30 градусе ФП таким образом его угол проводимости составляет  $30^0$  эл. град..  
 Результаты исследования УПВ обобщены в таблице на (рисунке 2.5, б.)

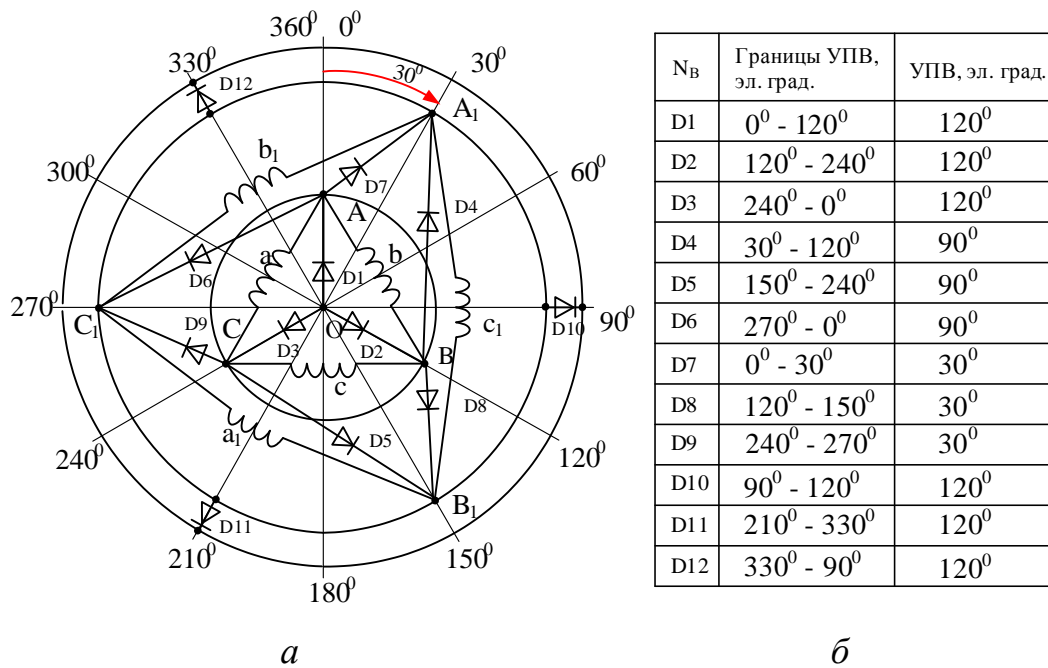


Рисунок 2.5 – Кольцевой 12-ти пульсовой схема выпрямления *a* – ВФП выпрямителя;  
 б – таблица УПВ

В работе доказывается, что данная методика применима для комбинированных многопульсовых схемных решений на основе параллельного соединения ТВС и применения кольцевых вентильных схем.

Проведенный анализ по определению УПВ базовых схемных решений трехфазных выпрямителей показывает, что данная методика применима для сложных многопульсовых схемных решений в основе синтеза которых лежат рассмотренные схемотехнические решения. Разработанная последовательность действий реализующая фазо-аналитическую методику по определению УПВ трехфазных выпрямительных схемотехнических решений; показывает, что:

1. упрощенная процедура позволяет наглядно и убедительно установить взаимосвязь фазовых структур ВО и вентилей формирующих УПВ с конкретизацией углового диапазона каждого вентиля;
2. облегчает процесс определения цепи протекания тока формирующего пульсации с определением углов проводимости каждого вентиля;

2. наглядно определен принцип формирования УПВ в кольцевых вентильных структурах;

3. установлена особенность образования УПВ при параллельном соединении ТВС свидетельствующая о их сокращении на величину фазового сдвига (6-ти пульсовых –  $60^0$ , 12-ти пульсовых –  $30^0$ ).

5. приведенные примеры определения УПВ на базе известных схемотехнических решений выпрямителей характеризуют возможность методики по расширению диапазона исследования комбинированных многопульсовых выпрямителей.

## **2.2 Техничко-энергетические показатели при анализе электромагнитных процессов кольцевых двадцатичетырех пульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов модульного типа**

Объектом настоящего исследования являются кольцевые 24-х пульсовые ТВА с последовательным и параллельным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей (ТВМ), предлагаемые для замены 12-ти пульсовых мостовых ТВА ТП постоянного тока. Требуется получить аналитическое описание происходящих электромагнитных процессов (ЭМП) в модульных ТВА с кольцевыми вентильными схемами при последовательном и параллельном соединении ТВМ. Аналитическое описание ЭМП важны для понимания работы выпрямителей с теоретической точки зрения. В настоящем исследовании использование метода кусочно-припасовочного, важен для анализа выпрямителей поскольку он удобен для исследования и расчета периодически повторяющихся переходных процессов, характерных для ТВА [71-73]. Для существенного упрощения математического аппарата в условиях расчета нелинейных цепей применен метод кусочно-припасовочный [73].

Для исследования на первом этапе приняты следующие допущения [18,74-75]:

1) вентили – это идеальные ключи с  $R_d \rightarrow 0$  в положении «включено» и  $R_d \rightarrow \infty$  в положении «выключено» в силу условия пренебрежения влиянием параметров вентиля на параметры выпрямленного тока;

2) трансформаторы – идеальны с  $K_T = 1$ , они также идентичны;

3) выпрямленный ток не содержит пульсаций (пренебрегаем входным фильтром, у сглаживающего реактора индуктивность  $L_d (X_d) = \infty$ ), это снимает необходимость учета влияния параметров конкретного реактора на параметры выпрямленного тока.

Эти принятые допущения в математической модели выпрямителя помогают не использовать сложные математические соотношения, возникающие использованием аппарата дифференциального исчисления.

### 2.2.1 Исследование двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с последовательным соединением модулей

Принципиальная схема 24-х пульсового кольцевого ТВА на (рисунке 2.6) синтезированного с помощью метода вращающихся векторных диаграмм, содержит два идентичных 12-ти пульсовых ТВМ [68].

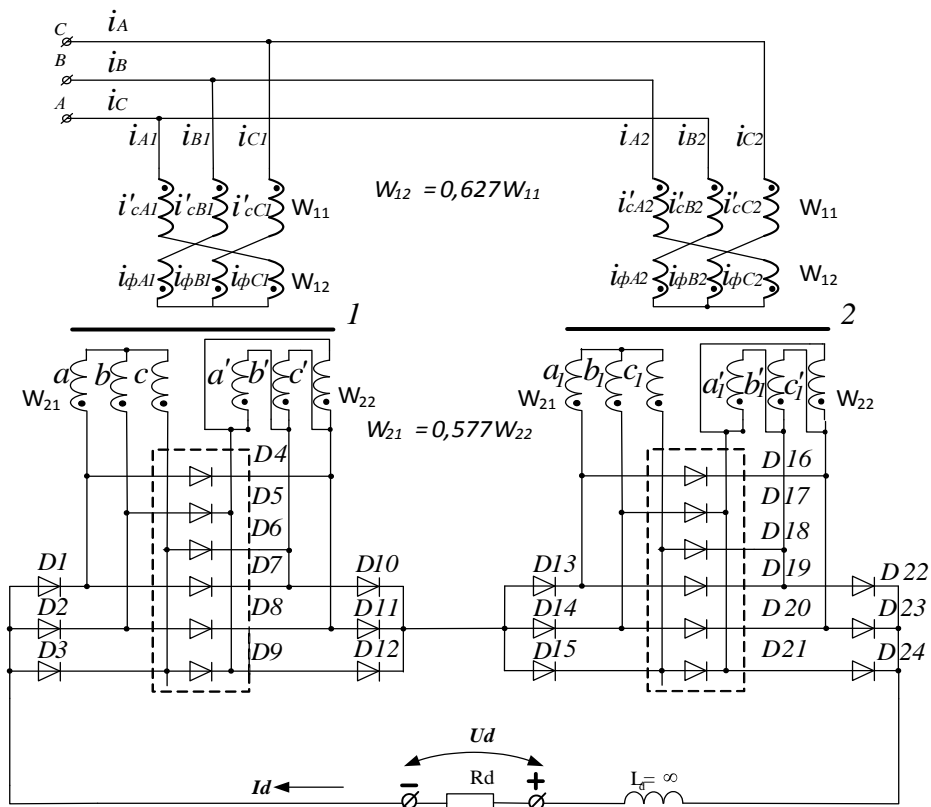


Рисунок 2.6 – Принципиальная схема 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ

Каждый модуль содержит трансформатор, первичные обмотки которого соединены в «неравноплечий зигзаг», создающий фазовый сдвиг  $15^\circ$  эл. градусов

между трансформаторами, ВО на каждом стержне трансформаторов имеют только два значения чисел витков, соединены на каждом трансформаторе между собой в «звезду» и «треугольник», образуя шестифазные системы ЭДС [76]. Отводы вторичных фазных обмоток каждого трансформатора подключены к двум шестифазным кольцевым схемам выпрямления, которые соединены между собой последовательно [77-79]. Принцип формирования результирующих напряжений выпрямителя представлен в виде векторов  $S_1...S_{24}$  он иллюстрируется векторными диаграммами на рисунке 2.7.

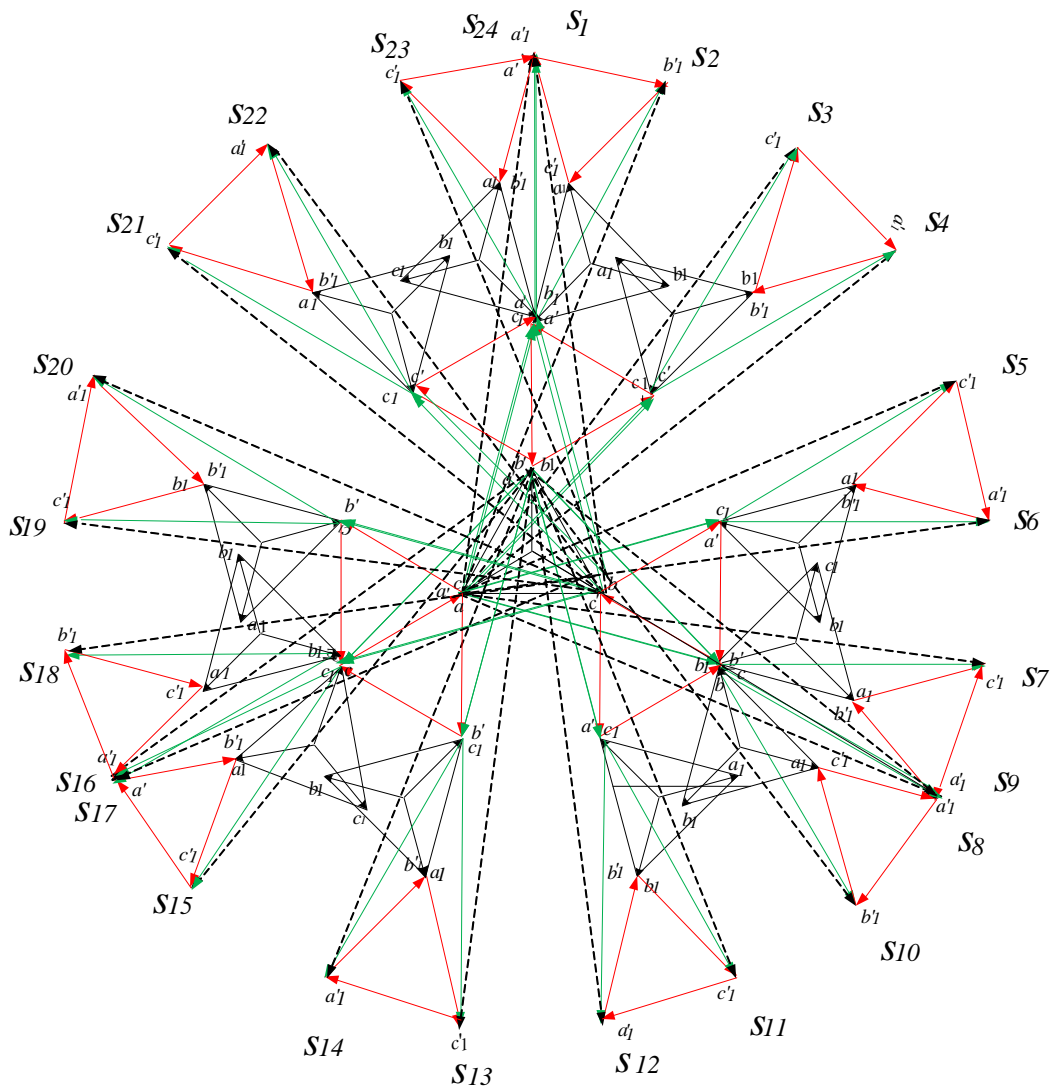


Рисунок 2.7 – Векторная диаграмма 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ

Представлены в виде амплитудно-фазовых портретов (АФП) напряжений вторичных обмоток, составляющие две шестифазные системы симметричных напряжений развернутыми на фазовой плоскости векторными диаграммами. Применяемые шестифазные системы ЭДС определяют топологию построения векторных диаграмм и формируют их амплитудно-фазовые характеристики. Вентильные обмотки «звезда» и «треугольника» с соотношением витковых чисел  $1 : 1/\sqrt{3}$  обеспечивают формирование результирующих напряжений, модули векторов которых равны и на  $30^\circ$  эл. град. на фазовой плоскости сдвинуты друг относительно друга. Затем фиксируем первую систему диаграмму напряжений, а вторую диаграмму напряжений второй системы вращаем вокруг нее, таким образом получаем 24 результирующих вектора напряжений за один период сетевого напряжения. Для каждого фиксированного положения на фазовой плоскости систем напряжений, определяем элементы вентильной конструкции, также порядок работы вентиля и вторичных обмоток. Четыре положения систем ВО на (рисунок 2.8) показывают порядок формирования векторов результирующих напряжений S1-S2, S9-S10, S15-S16, S23-S24.

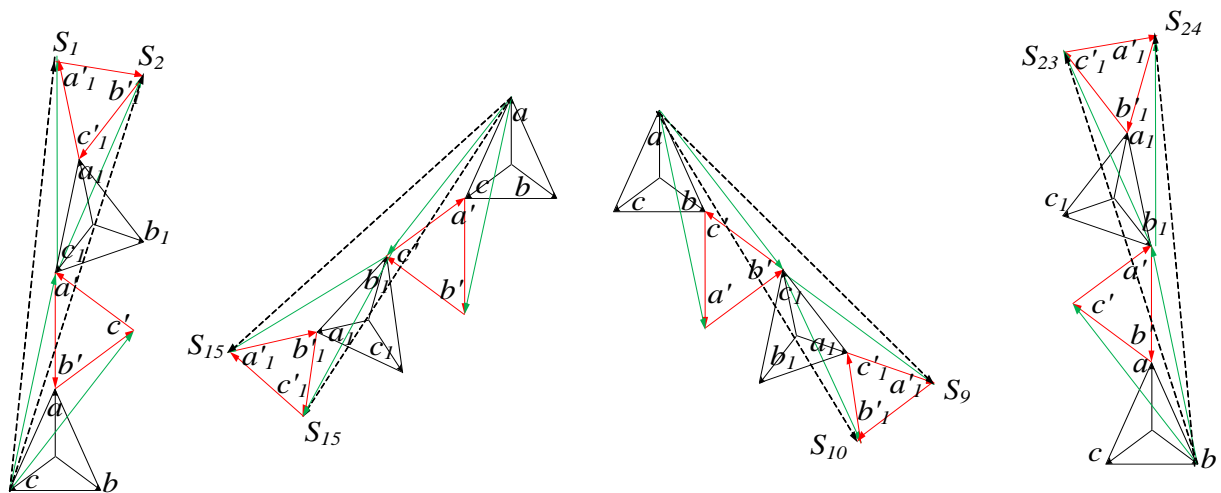


Рисунок 2.8 – Фрагменты формирования результирующих пульсаций развёрнутых векторных диаграмм

По принципу работы ТВА (рисунок 2.6) и из особенностей формирования результирующих напряжений по векторным диаграммам напряжений источников ЭДС (рисунок 2.7), устанавливают чередование соединения цепей протекания тока

нагрузки для всех двадцатичетырех фаз выпрямительного процесса показаны в таблице 2.1. В которой выделены номера вентилях, включенных под воздействием индексов линейных напряжений по порядку вступления в работу при формировании пульсаций  $S_i$ , они приведены в соответствии с векторной диаграммой на рисунке 2.7.

Таблица 2.1 – Порядок работы ВО и вентилях ТВА с последовательным соединением  
ТВМ

Пульсация	Индексы линейных напряжений	Номера вентилях
S1	$bc-a' \rightarrow b_1a_1-c'_1$	D2, D6, D12 $\rightarrow$ D14, D21, D23
S2	$bc-a' \rightarrow a_1c_1-c'_1$	D2, D6, D12 $\rightarrow$ D13, D21, D23
S3	$bc-b' \rightarrow a_1c_1-c'_1$	D2, D6, D11 $\rightarrow$ D13, D21, D23
S4	$bc-b' \rightarrow a_1c_1-a'_1$	D2, D6, D11 $\rightarrow$ D13, D21, D22
S5	$ac-b' \rightarrow a_1c_1-a'_1$	D1, D6, D11 $\rightarrow$ D13, D21, D22
S6	$ac-b' \rightarrow a_1b_1-a'_1$	D1, D6, D11 $\rightarrow$ D13, D17, D22
S7	$ac-c' \rightarrow a_1b_1-a'_1$	D1, D9, D11 $\rightarrow$ D13, D17, D22
S8	$ac-c' \rightarrow a_1b_1-b'_1$	D1, D9, D11 $\rightarrow$ D13, D20, D22
S9	$ab-c' \rightarrow a_1b_1-b'_1$	D1, D5, D11 $\rightarrow$ D13, D20, D22
S10	$ab-c' \rightarrow c_1b_1-b'_1$	D1, D5, D11 $\rightarrow$ D15, D20, D22
S11	$ab-a' \rightarrow c_1b_1-b'_1$	D1, D5, D10 $\rightarrow$ D15, D20, D22
S12	$ab-a' \rightarrow c_1b_1-c'_1$	D1, D5, D10 $\rightarrow$ D15, D20, D24
S13	$cb-a' \rightarrow c_1b_1-c'_1$	D3, D5, D10 $\rightarrow$ D15, D20, D24
S14	$cb-a' \rightarrow c_1a_1-c'_1$	D3, D5, D10 $\rightarrow$ D15, D16, D24
S15	$cb-b' \rightarrow c_1a_1-c'_1$	D3, D8, D10 $\rightarrow$ D15, D16, D24
S16	$cb-b' \rightarrow c_1a_1-a'_1$	D3, D8, D10 $\rightarrow$ D15, D19, D24
S17	$ca-b' \rightarrow c_1a_1-a'_1$	D3, D4, D10 $\rightarrow$ D15, D19, D24
S18	$ca-b' \rightarrow b_1a_1-a'_1$	D3, D4, D10 $\rightarrow$ D14, D19, D24
S19	$ca-c' \rightarrow b_1a_1-a'_1$	D3, D4, D12 $\rightarrow$ D14, D19, D24
S20	$ca-c' \rightarrow b_1a_1-b'_1$	D3, D4, D12 $\rightarrow$ D14, D19, D23
S21	$ba-c' \rightarrow b_1a_1-b'_1$	D2, D4, D12 $\rightarrow$ D14, D19, D23
S22	$ba-c' \rightarrow b_1c_1-b'_1$	D2, D4, D12 $\rightarrow$ D14, D18, D23
S23	$ba-a' \rightarrow b_1c_1-b'_1$	D2, D7, D12 $\rightarrow$ D14, D18, D23
S24	$ba-a' \rightarrow b_1c_1-c'_1$	D2, D7, D12 $\rightarrow$ D14, D21, D23

По схеме работы вентиляхных обмоток и вентилях (таблица 2.1 и рисунок 2.9) определено, что за период выпрямленного напряжения группы: аноды вентилях (1, 2, 3, 13, 14, 15) и катоды вентилях (10, 11, 12, 22, 23, 24) имеют угол проводимости  $120^0$  эл. град.; углы проводимости вентилях кольцевой группы составляют  $90^0$  эл. град. (для вентилях 7, 8, 9, 19, 20, 21) и  $30^0$  эл. град. (для вентилях 4, 5, 6, 16, 17, 18).

Составим уравнения в полном соответствии с принятыми направлениями токов и обозначениями обмоток на схеме (рисунок 2.6), при этом первое и второе уравнение системы по второму закону Кирхгофа для магнитных цепей учитывая пренебрежение намагничивающими токами, а третье уравнение – по первому закону Кирхгофа для электрических цепей.

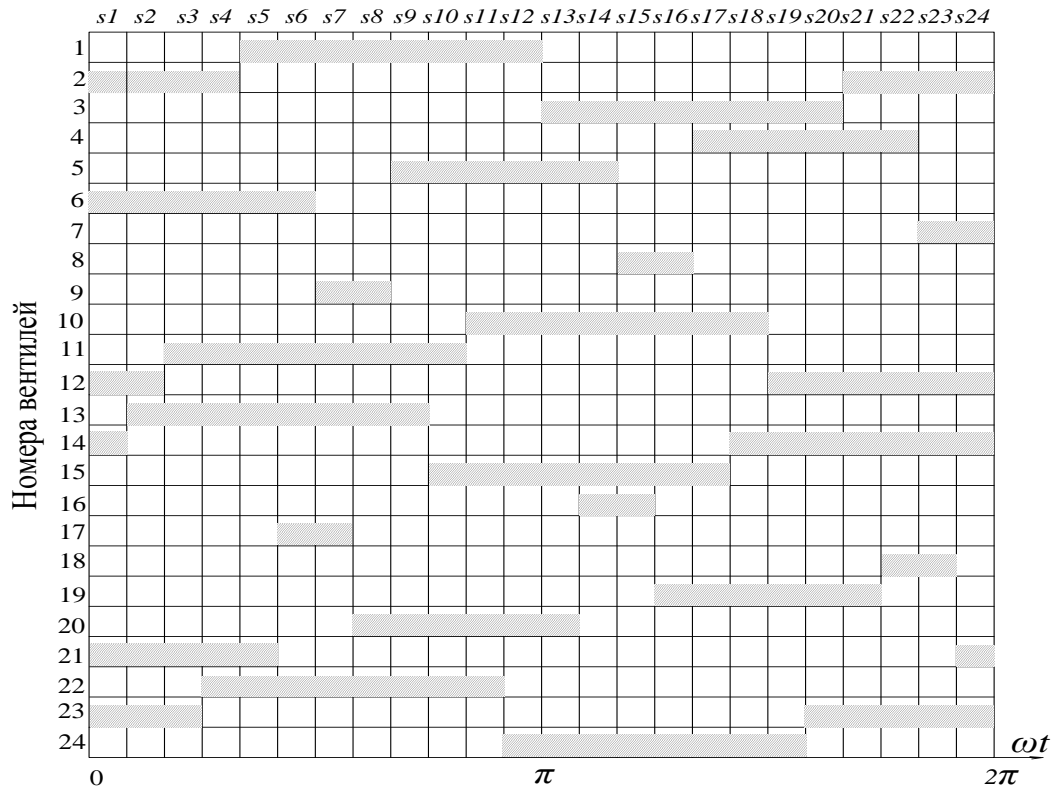


Рисунок 2.9 – Последовательность работы вентиляей 24-х пульсового модульного ТВА с последовательным соединении ТВМ при идеальной коммутации

В силу условия идентичности трансформаторно-выпрямительных модулей аналитическое описание происходящих электромагнитных процессов проведем на одном первом модуле (ТВМ-I).

#### *Трансформаторно выпрямительный модуль-I*

Пренебрегая токами холостого хода для первичной и вторичной обмоток для стержней трансформатора I запишем уравнения намагничивающих сил,:

$$F_{w1} = wi_a + \sqrt{3}wi_{a'} - wi_{A1}; \quad (2.1)$$

$$F_{w1} = wi_b + \sqrt{3}wi_{b'} - wi_{B1}; \quad (2.2)$$

$$F_{w1} = wi_c + \sqrt{3}wi_{c'} - wi_{C1}. \quad (2.3)$$

Кроме того, для первичной цепи трансформатора:

$$i_{A1} + i_{B1} + i_{C1} = 0. \quad (2.4)$$

Решая совместно систему уравнений (2.1) – (2.4), находим токи трехфазной сети  $i_{A1}$ ;  $i_{B1}$  и  $i_{C1}$  по заданным токам нагрузки:

$$i_{A1} = \frac{1}{3} \cdot (2i_a - i_b - i_c) + \frac{\sqrt{3}}{3} (2i_{a'} - i_{b'} - i_{c'}); \quad (2.5)$$

$$i_{B1} = \frac{1}{3} \cdot (-i_a + 2i_b - i_c) + \frac{\sqrt{3}}{3} (-i_{a'} + 2i_{b'} - i_{c'}); \quad (2.6)$$

$$i_{C1} = \frac{1}{3} \cdot (-i_a - i_b + 2i_c) + \frac{\sqrt{3}}{3} (-i_{a'} - i_{b'} + 2i_{c'}). \quad (2.7)$$

Для нахождения намагничивающей силы ( $F_w$ ) подставим полученные выражения в (2.1),:

$$F_{w1} = \frac{1}{3} \cdot (i_a + i_b + i_c) + \frac{\sqrt{3}}{3} (i_{a'} + i_{b'} + i_{c'}). \quad (2.8)$$

Работу вентиляльных обмоток трансформатора 1 (рисунок 2.10) выразим диаграммой по выражению (2.8) отобразим кривую намагничивающей силы  $F_{w1}$  в стержне трансформатора, и по выражению (2.5) кривую питающего тока, например, фазы «А» трансформатора 1 (рисунок 2.10).

Из формы кривой питающего тока  $i_{A1}$  следует, что ТВМ-I за период сетевого тока формирует двенадцать пульсаций. Из диаграммы видно, что намагничивающая сила равна нулю. Это характеризуется тем, что установлено магнитная система ТВМ-I уравновешена. Типовая мощность (коэффициент установленной мощности) трансформатора 1 в относительных единицах, известно, что определяется как типовая мощность трансформатора  $S_{T1}$  состоящая из полусуммы мощностей обеих частей обмоток: первичных обмоток  $S_{T1\Sigma}^{(1)}$  и вторичных обмоток  $S_{T1\Sigma}^{(2)}$ . 40, [52-53]:



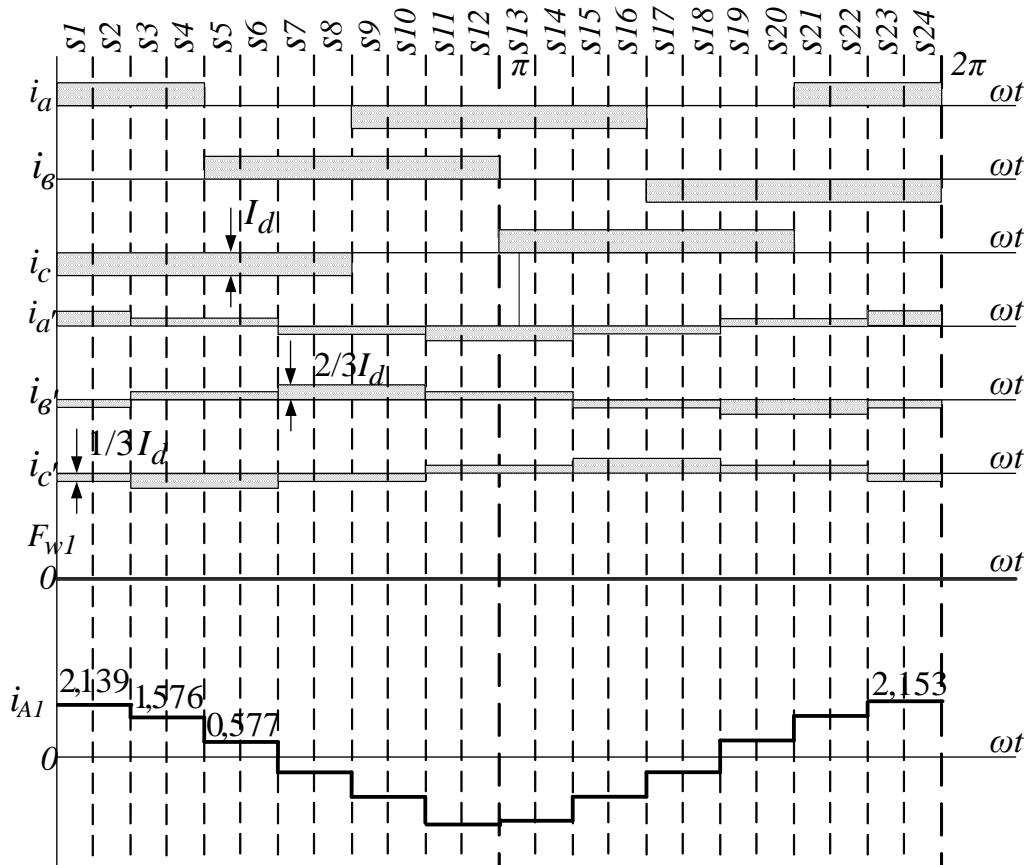


Рисунок 2.10 – Диаграммы работы токов вентиляльных обмоток ТВМ-I

$$S_{T1} = \frac{S_{T1\Sigma}^{(1)} + S_{T1\Sigma}^{(2)}}{2}. \quad (2.9)$$

Определим продолжительность ВО исходя из схемы их работы (табл. 2.1). Токи имеют прямоугольную форму (рисунок 2.10) в обмотках при допущении  $L_d = \infty$ . Благодаря этому можно рассчитать значение тока действующего в обмотках в относительных единицах:

$$I_{2T1}^* = \sqrt{I_d^2 T1 \cdot (t_{обм}) \cdot \frac{1}{2\pi}},$$

где  $t_{обм}$  – в течении этого периода работает обмотка.

Пропускают ток  $240^0$  эл. град., вторичные обмотки звезды, а треугольника –  $360^0$  эл. град. Исходя из этого принимаем  $I_d = 1,0$  о.е., тогда получим значения токов действующих ВО треугольника  $I_{2\Delta}^*$  и звезды  $I_{2Y}^*$ :

$$I_{2Y_{T1}}^* = \sqrt{\frac{240}{360}} = 0,816 \text{ о.е.}$$

$$I_{2\Delta T1}^* = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right)^2 \frac{120}{360} + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \frac{240}{360}} = 0,4714 \text{ о.е.}$$

Исходя из того, что обмотки треугольника находятся под током  $360^0$  эл. град., при этом только  $240^0$  эл. град. протекает ток через них, равный  $1/3$  тока нагрузки,  $2/3$  протекает ток через них при  $120^0$  эл. град., равный двум третьим тока нагрузки (рисунок 2.11) позволило получить второе соотношение.

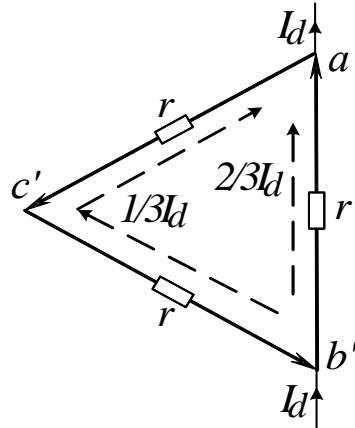


Рисунок 2.11 – В обмотке «треугольник» порядок распределения тока

Из рисунка 2.7 с помощью векторных диаграмм определяем максимальное значение ( $U_{dmax}$ ) напряжения на выходе ТВА которое равно 3,346 о.е. в соответствии с топологическим размером обмотки звезды. Амплитуду фазного напряжения звезды возьмем за относительную единицу. Значение напряжения на холостом ходу  $U_{d0}^*$  среднее по известному соотношению, в котором  $p$  – пульсность определяем:

$$U_{d0T1}^* = u_{dmaxT1}^* \cdot \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} = 3,346 \cdot 0,9886 = 3,308 \text{ о.е.}$$

Действующие значения напряжений на вентильных обмотках  $U_{2Y T1}^*$  и  $U_{2\Delta T1}^*$  можно отразить в относительных единицах, для этих целей их амплитудные значения в относительных единицах (1,0;  $\sqrt{3}$ ) делим произведение  $\sqrt{2}$  на среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{d0T1}$  в о.е., и получаем:

$$U_{2Y T1}^* = \frac{U_{2mT1}^*}{U_{d0T1}^* \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{3,308 \cdot \sqrt{2}} = 0,214 \text{ о.е.}; \quad U_{2\Delta T1}^* = \frac{1,732}{3,308 \cdot \sqrt{2}} = 0,37 \text{ о.е.}$$

Мощность всех обмоток звезды равна произведению действующих значений тока и напряжения [40, 41] по формуле::

$$S_{2Y_{T1}}^* = 3 \cdot I_{2Y_{T1}}^* \cdot U_{2Y_{T1}}^* = 3 \cdot 0,816 \cdot 0,214 = 0,524 \text{ о.е.},$$

Для трех обмоток треугольника мощность составляет:

$$S_{2\Delta_{T1}}^* = 3 \cdot I_{2\Delta_{T1}}^* \cdot U_{2\Delta_{T1}}^* = 3 \cdot 0,4714 \cdot 0,37 = 0,523 \text{ о.е.}$$

Для вторичных обмоток полная мощность составляет:

$$S_{2T1}^* = S_{2\Delta_{T1}}^* + S_{2Y_{T1}}^* = 1,047 \text{ о.е.}$$

Полную мощность первичных обмоток определим в соответствии с [40, 41], по следующему выражению получим относительно мощности  $P_d$ :

$$S_1^* = \frac{1}{\frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p}} = 1,0115 \text{ о.е.}$$

Для определения типовой мощности первичных обмоток необходимо определить действующее значения тока и напряжения. Действующее значения тока уточним по временной диаграмме (рисунок 2.9) из нее следует  $I_{A1T1}^* = 1,576$ .

Действующие значения напряжений на обмотках  $U_{1Z_{T1}}^*$  выражается в относительных единицах, при этом их значения амплитуд в о.е. (1,115) делим на произведение  $\sqrt{2}$  на среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{d0T1}$  в о.е., и получаем:

$$U_{1Z_{T1}}^* = \frac{U_{1m_{T1}}^*}{U_{d0T1}^* \cdot \sqrt{2}} = \frac{1,115}{3,308 \cdot \sqrt{2}} = 0,238 \text{ о.е.};$$

При соединении первичных обмоток трансформатора в «неравноплечий зигзаг» для реализации фазового сдвига  $15^0$  эл. градусов между трансформаторами, соответственно типовая мощность первичных обмоток одного трансформатора для схемы зигзага согласно [76] будет выражаться следующим образом:

$$S_Z^* = 2\sqrt{3} \cdot I^* \cdot U^* \left[ \left( \sin \frac{\pi}{3} - \delta \right) + \sin \delta \right]. \quad (2.10)$$

При  $\delta = \frac{\pi}{12}$  для 24-х пульсового выпрямителя.

Подставляем значения в (2. 13) и получим следующее значение:

$$S_{1ZT1}^* = 3 \cdot I_{A1T1}^* \cdot U_{1ZT1}^* = 3 \cdot 1,576 \cdot 0,238 = 1,125.$$

Для получения типовой мощности трансформатора 1 в относительных единицах подставляем значения типовых мощностей первичных и вторичных обмоток в выражения(2.9):

$$S_{T1}^* = \frac{S_{1T1}^* + S_{2T1}^*}{2} = \frac{1,125 + 1,047}{2} = 1,086 \text{ о.е.}$$

Углы проводимости вентиляей ( $\lambda$ ) схемотехнического решения определим в соответствии с графоаналитическим методом исследования в [70]. Так как рассматриваемый 24-х пульсовой кольцевой модульный ТВА представляет собой два 12-ти пульсовых кольцевых ТВМ соединенных последовательно в которых коммутация токов в соответствии с [18, 74-75] осуществляется внутри отдельных модулей (секций) и не зависят друг от друга, то углы проводимости вентиляей определяем для одной секции. В общем случае, для  $p$ -пульсных выпрямителей углы проводимости вентиляей 6-ти вентиляных колец определяются по следующим формулам:

$$\alpha_i = \frac{\pi \{ p - 6(-1)^i \}}{3p}, \text{ эл. град.}; \quad (2.11)$$

$$\beta_i = \frac{\pi \{ p + 6(-1)^i \}}{3p}, \text{ эл. град.}, \quad (2.12)$$

Граф 12-ти пульсового ТВМ и схема определения углов проводимости вентиляей (УПВ) приведены на рисунке 2.12 где  $\forall i = \in [1, i_x]$  номер  $i$ -го кольца вентиляного расчет ведем от первого уровня питания (от верхнего уровня на рисунке), при этом последний номер выявляется соотношением  $i_x = (p - 6)/6$ . Три вентиля

кольца имеют угол проводимости  $\alpha_i = 90^\circ$  при  $p = 12$  (только одно кольцо и  $i = 1$ ), а три оставшихся –  $\beta_i = 30^\circ$ . Исследования помогают сформулировать вытекающее правило, для установления принадлежности углов проводимости вентиляей  $\alpha_i$  и  $\beta_i$ . Вентили имеющие больший угол проводимости, равный  $\alpha = (2\pi/3 + 2\pi/p) - \pi/3$ , проводят соединения фаз смежных систем ЭДС имеющих наибольший фазовый сдвиг, а вентили с имеющимся меньшим углом проводимости равный  $\beta = (2\pi/3 - 2\pi/p) - \pi/3$ , и производят соединения фаз смежных систем ЭДС обладающих наименьшим фазовым сдвигом.

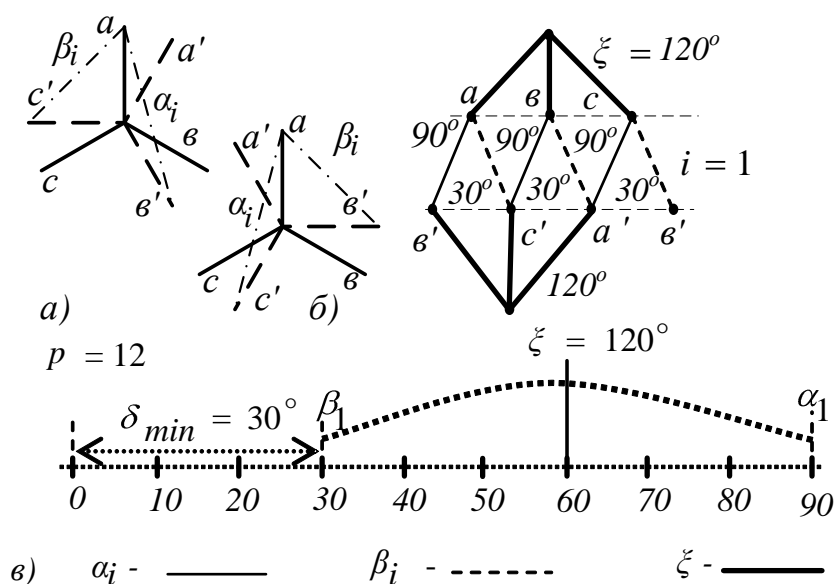


Рисунок 2.12 – Граф и схема определения углов проводимости вентиляей в 12-ти пульсовых ТВМ-I и ТВМ-II

Так, на (рисунок 2.12, а) фаза  $v'$  с фазой  $a$  связана с вентилем имеющего угол проводимости  $\alpha_i$ , а на (рисунок 2.12, б) фаза  $c'$  с фазой  $a$  связана вентилем имеющего тот же угол проводимости. Показана зависимость соединений фаз между собой от направления фазового сдвига. Исходным источником является источник, «встречающий» первым ток нагрузки.

В результате анализа алгоритма работы вентиляей с использованием УПВ (2.11) и (2.12) установлены значения токов вентиляей анодный и действующий вентиляей.

Для вентилей анодно-катодной группы с углом проводимости  $\xi = 120$  эл. град. определим ток:

$$I_{a(AKГ)} = \frac{120}{360} \cdot I_d = \frac{I_d}{3} \text{ А.}$$

Значение действующего тока этих вентилей:

$$I_{a\partial(AKГ)} = \sqrt{\frac{120}{360}} \cdot I_d = \frac{I_d}{\sqrt{3}} \text{ А.}$$

У кольцевой группы вентилей с углом проводимости  $\beta = 30^0$  эл. град., анодный ток равен:

$$I_{a(KГ)} = \frac{30}{360} \cdot I_d = \frac{I_d}{12} \text{ А.}$$

Действующее значение тока вентилей с углом проводимости  $\beta = 30^0$  эл. град.:

$$I_{a\partial} = \sqrt{\frac{30}{360}} \cdot I_d = \frac{I_d}{\sqrt{12}} \text{ А.}$$

Для вентилей кольцевой группы с углом проводимости  $\alpha = 90^0$  эл. град., анодный ток равен:

$$I_{a(KГ)} = \frac{90}{360} \cdot I_d = \frac{I_d}{4} \text{ А.}$$

Действующее значение тока через вентилей с углом проводимости  $\alpha = 90^0$  эл. град.:

$$I_{a\partial(KГ)} = \sqrt{\frac{90}{360}} \cdot I_d = \frac{I_d}{2} \text{ А.}$$

Для вентилей анодных и катодных групп ТВМ-I, максимальное значение рабочего обратного напряжения равно  $U_{обр\max}^* = U_{Л\max}^* = 1,732$  о.е.

Для вентилей колец:

$$U_{обр\max}^*(p) = 2 \cdot U_{Л\max}^* \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{p}\right) = 2\sqrt{3} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{12}\right) = 3,346 \text{ о.е.,}$$

где:  $U_{Л\max}^*$  – обозначается линейное напряжение (действующее значение) вторичных обмоток трансформатора в относительных единицах берем значение 1,0 в о.е. – амплитуда напряжения вентильной обмотки «звезда».

### *Трансформаторно-выпрямительный модуль-II*

Исходя из условий идентичности ТВМ-I и ТВМ-II следует, что форма кривой питающего тока  $i_{A2}$  формирует двенадцать пульсаций за период действия сетевого тока, намагничивающая сила в стержнях второго трансформатора равна нулю и магнитная система ТВМ-II является уравновешенной.

Типовая мощность трансформатора  $S_{T2}$  определяется также как для  $S_{T1}$  и будет составлять:

$$S_{T2}^* = \frac{S_{1T2}^* + S_{2T2}^*}{2} = \frac{1,125 + 1,047}{2} = 1,086 \text{ о.е.}$$

Углы проводимости для клапанов анодно-катодной группы  $\lambda = 120^0$  эл. град., угол проводимости  $\lambda = 90^0$  эл. град. - три клапана кольцевой группы, а три оставшихся  $\lambda = 30^0$  эл. град..

Для клапанов анодных и катодных групп максимальное значение рабочего обратного напряжения равно  $U_{обр\max}^* = U_{Л\max}^* = 1,732$  о.е.

Для клапанов колец:

$$U_{обр\max}^*(p) = 2 \cdot U_{Л\max}^* \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{p}\right) = 2\sqrt{3} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{12}\right) = 3,346 \text{ о.е.},$$

Среднее значение напряжения на холостом ходу  $U_{d0}^*$ :

$$U_{d0T2}^* = u_{d\max T2}^* \cdot \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} = 3,346 \cdot 0,9886 = 3,308 \text{ о.е.}$$

Результаты анализа электромагнитных процессов в обоих ТВМ-I и ТВМ-II отображены в таблице 2.2 основные характеристики трансформаторов и клапанов.

Элементарный анализ электромагнитных процессов модулей I и II показал, что по техническим характеристикам они идентичны, а магнитная система ТВА образованная из последовательного соединения этих модулей является

уравновешенной. Используя полученные результаты, рассчитаем общую типовую мощность трансформаторного оборудования в относительных единицах (коэффициент установленной мощности)  $S_T^*$  состоящая из типовых мощностей двух трансформаторов.

Она определяется полусуммой мощностей обоих трансформаторов[52, 53] и составляет:

$$S_T^* = \frac{S_{T1}^* + S_{T2}^*}{2} = \frac{1,086 + 1,086}{2} = 1,086 \quad \text{или} \quad S_T = 1,086 \cdot P_d .$$

Таблица 2.2 – Расчетные соотношения характеристик трансформаторов и вентилях  
ТВА с последовательным соединением ТВМ

Модули	Характеристики																
	трансформаторов							вентилей									
	$I_{2Y} / U_{d0}$	$U_{2\Delta} / U_{d0}$	$I_{2Y} / I_d$	$I_{2\Delta} / I_d$	$I_{1Y} / I_d$	$S^*_{T1}$	$S^*_{T2}$	Анодный ток			Эффективный ток			$U_{OBRmax}$			
								AKT	Кольцо	Кольцо	AKT	Кольцо	Кольцо	AKT	Кольцо	Кольцо	
	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	$\varphi$	
120°	90°	30°	120°	90°	30°	120°	90°	30°	120°	90°	30°	120°	90°	30°			
ТВМ-I	0,214	0,37	0,816	0,4714	$\frac{1,576}{K_T}$	1,125	1,047	1,086	$0,333 I_d$	$0,25 I_d$	$0,8333 I_d$	$0,577 I_d$	$0,5 I_d$	$0,2886 I_d$	$0,524 U_d$	$1,013 U_d$	$1,013 U_d$
ТВМ-II	0,214	0,37	0,816	0,4714	$\frac{1,576}{K_T}$	1,125	1,047	1,086	$0,333 I_d$	$0,25 I_d$	$0,8333 I_d$	$0,577 I_d$	$0,5 I_d$	$0,2886 I_d$	$0,524 U_d$	$1,013 U_d$	$1,013 U_d$

Такой показатель типовой мощности является очень хорошим для схемотехнических решений ТВА, в которых используется два трансформатора.

Из векторных диаграмм (рисунок 2.7) установлено, что значение выпрямленного напряжения (максимальное) равно значению 5,4495 в о.е.

Используя известное соотношение определим ( $U_{d0}^*$ ) – среднее значение напряжения на холостом ходу:



$$U_{do}^* = u_{d\max}^* \cdot \frac{p}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{p} = 5,4495 \cdot \frac{24}{3,14} \cdot \sin \frac{180^\circ}{24} = 5,434$$

Сетевой ток  $i_A$ , потребляемый обоими трансформаторами, состоит из суммы токов

$$i_A = i_{A1} + i_{A2}.$$

Построим кривую общего сетевого тока  $i_A$ , потребляемого парой трансформаторов ТВА воспользовавшись формулой (2.5), а также данными из таблицы 2.1. приведены на рисунке 2.13.

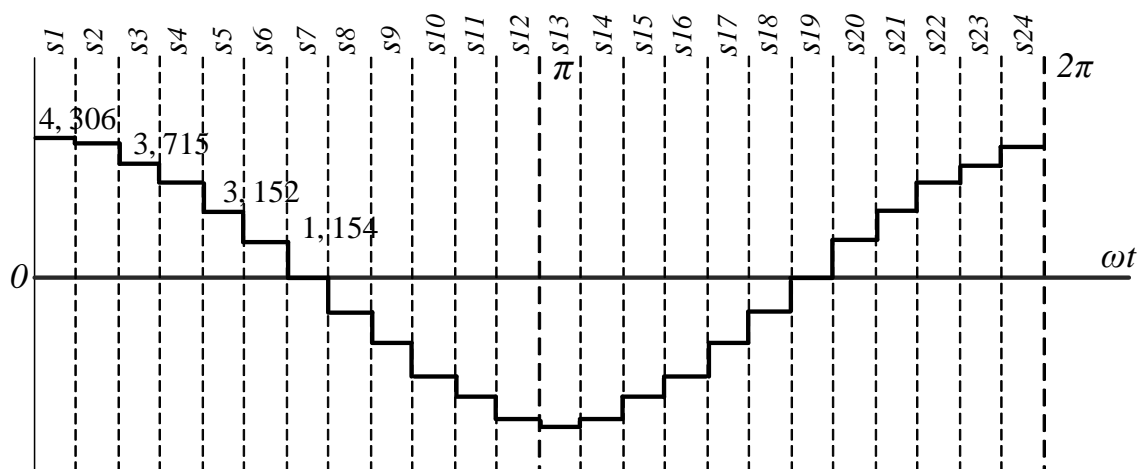


Рисунок 2.13 – Диаграмма общего сетевого тока потребляемого парой трансформаторов ТВА в фазе А

Из формы кривой на диаграмме следует, что она близка к синусоидальной форме, а значит в потребляемом токе состав высших гармоник незначительный, что обеспечивает высокую электромагнитную совместимость. Из диаграммы сетевого тока (рисунок 2.13) определяем действующее значение тока которое составляет  $I_A = 3.043 I_d$ . Параметры рассмотренного 24-х импульсного ТВА с последовательным соединением ТВМ приведены в таблице 2.4.

Существенной особенностью выпрямителя является то, что выходное напряжение каждого модуля является каноническим 12-ти импульсным, а при суммировании этих напряжений в ТВА с фазовым сдвигом в  $15^\circ$  эл. град. выпрямленное напряжение становится 24-х импульсным, а 12-е гармоники компенсируются. Таким образом качество выпрямленного напряжения обеспечивается и даже значительной конструктивной несимметрии напряжений

вторичных обмоток, выполненных с отклонением от расчетного соотношения, равного 1:0,577. При условии несимметрии напряжений вентиляльных обмоток модулей в выпрямленном напряжении проявляется действие только 12-й гармоники, а не 6-й, как это бывает в [46, 79, 82] известном 24-х пульсовом ТВА. Это объясняется тем, что в формировании кривой выпрямленного напряжения участвуют два типоразмера вентиляльных обмоток, а не четыре как в 24-х пульсовом ТВА (рисунок 1.9). Это объясняется формированием кривой выпрямленного напряжения двумя независимыми и идентичными Трансформаторно-выпрямительными модулями с применением кольцевой схемы.

### 2.2.2 Исследование двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с параллельным соединением модулей

Принципиальная схема, 24-х пульсного кольцевого модульного преобразователя последовательного типа, синтезирована с помощью метода вращающихся векторных диаграмм и представлена на рисунке 2.14 [80].

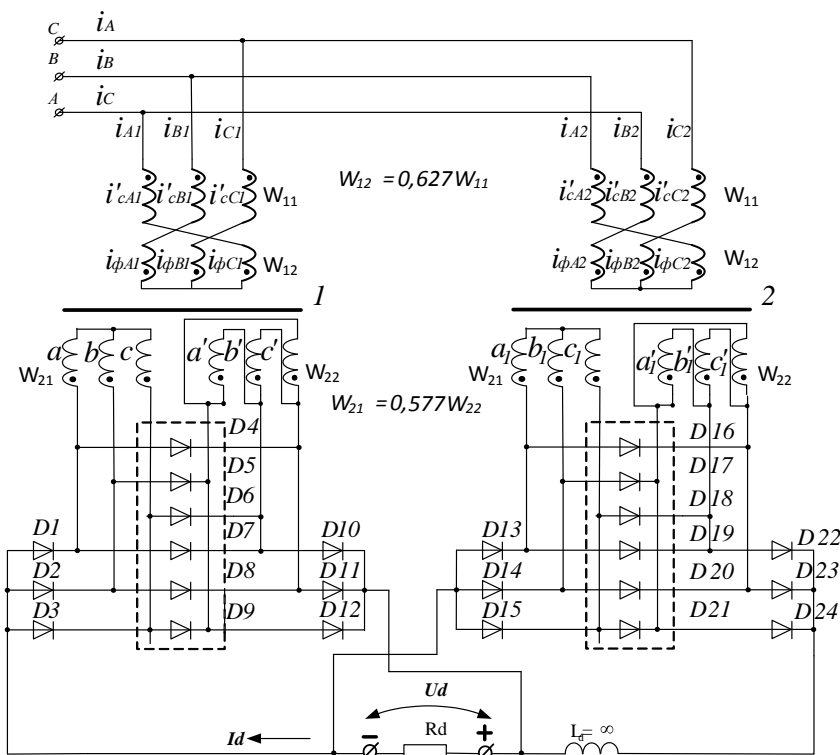


Рисунок 2.14 – Принципиальная схема 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ

Схема содержит два идентичных 12-ти пульсовых кольцевых ТВМ, каждый из которых состоит из трансформатора на котором первичные обмотки имеют соединения в «неравноплечий зигзаг», создающих фазовый сдвиг  $7,5^0$  эл. градусов относительно напряжения сети, вторичные обмотки имеют по два значения витковых чисел, которые на каждом трансформаторе соединены между собой в «звезду» и «треугольник», образуя шестифазные системы ЭДС.

Отводы вторичных фазных обмоток каждого трансформатора подключены к двум шестифазным кольцевым схемам выпрямления, которые параллельно соединены между собой [80, 81]. Принцип функционирования выпрямителя отражен в векторных диаграммах напряжений в виде амплитудно-фазовых портретов (АФП) напряжений вторичных обмоток. Которые формируют две симметричные шестифазные системы напряжений, развернутых на фазовой плоскости векторными диаграммами, поясняющими принцип формирования результирующих векторов напряжений (S1...S24) представленных на рисунке 2.15. Векторные диаграммы содержат амплитудно-фазовые характеристики применяемых в схемном решении двух шестифазных систем ЭДС. Соотношения витковых чисел вторичных обмоток ( $1:1/\sqrt{3}$ ) также наличие фазового сдвига  $15^0$  эл. градусов между шестифазными симметричными системами создает динамичное формирование результирующих напряжений. Модули векторов второй шестифазной системы напряжений равны модулям первой шестифазной системы напряжений и сдвинуты друг относительно друга на фазовой плоскости на  $15^0$  эл. град. Фиксируем условно на фазовой плоскости первую шестифазную систему векторов напряжений, а вторую систему векторов напряжений перемещаем относительно первой по кольцу фазовой плоскости за период сетевого напряжения получаем 24 вектора результирующих напряжений (рисунок 2.15).

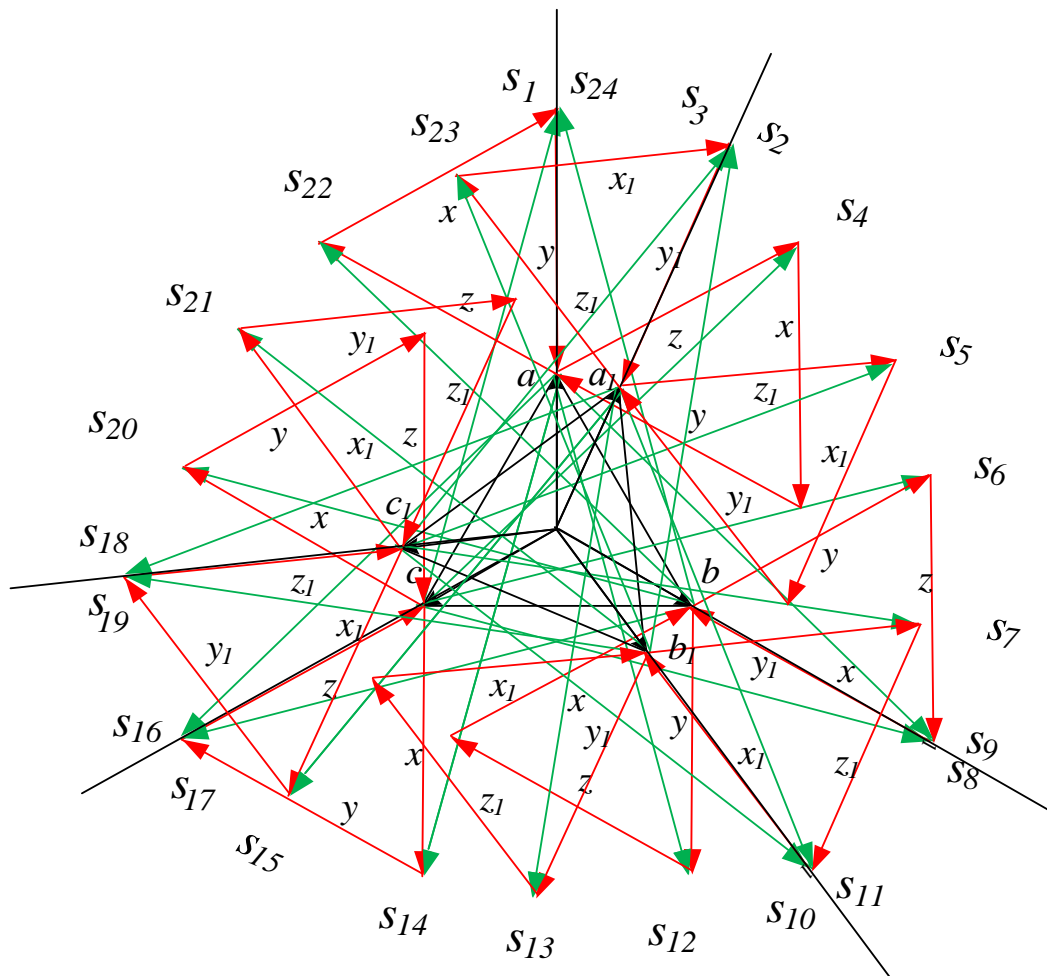


Рисунок 2.15 – Векторная диаграмма 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА с параллельным соединением ТБМ

Для каждого «фиксированного» положения шестифазных векторных систем на фазовой плоскости определяются элементы вентильной конструкции, также порядок работы вентиля и вторичных обмоток и определяются элементы вентильных связей, которые сведены в таблицу 2.3. Устройство и порядок работы ТВА с 24-х пульсового выпрямленного напряжения состоит из двух ТБМ соединенных параллельно отображен на (рисунке 2.14).

ТВА с параллельным соединением ТБМ содержит два ТПЧФ на трехфазных трансформаторах 1 и 2 которые формируют две симметричные шестифазные системы ЭДС с фазовым сдвигом в  $15^0$  эл. град. с выводами источников  $a, b, c; x, y, z$  и  $a_1, b_1, c_1; x_1, y_1, z_1$ , и 24 вентиля (1...2) из которых образованы два шестивентильных кольцевых схем выпрямления. Вентили 1...12 составляют первую кольцевую схему выпрямления, а вентили 13...24 составляют вторую кольцевую схему выпрямления.

Вентили первой кольцевой схемы выпрямления 1, 2, 3 соединены между собой анодами, образуя анодную группу, а катодами соединены с выводами источника а, b, с, вентили 10, 11, 12 соединены между собой катодами образуя катодную группу, а анодами соединены с выводами источника x, y, z. Вентили 6...11 образуют кольцевую группу вентиляей, которые анодами попарно 4 и 7, 5 и 8, 6 и 9 соединены с выводами источника а, b, с соответственно, а их катоды попарно 5 и 9, 6 и 7, 4 и 8 соединены с выводами источника x, y, z соответственно. Вентили другой кольцевой схемы выпрямления 13, 14, 15 соединены между собой анодами, образуя анодную группу, а катодами соединены с выводами источника  $a_1, b_1, c_1$ . Вентили 22, 23, 24 соединены между собой катодами образуя катодную группу, а анодами соединены с выводами источника  $x_1, y_1, z_1$ , вентили 16...21 образуют кольцевую группу вентиляей, которые анодами попарно 16 и 19, 17 и 20, 18 и 21 соответственно подключены к выводам источника  $a_1, b_1, c_1$ , катоды вентиляей попарно 17 и 21, 18 и 19, 16 и 20 соответственно подключены к выводам источника  $x_1, y_1, z_1$ . Параллельное соединение выпрямительных каскадов обеспечивается подключением в узел с точкой 25 общих точек вентиляей катодных групп 1, 2, 3 и вентиляей кольцевой схемы и 13, 14, 15 второй кольцевой схемы, а в общий узел с точкой 26 всех анодных групп вентиляей 10, 11, 12 первой кольцевой схемы и 22, 23, 24 второй кольцевой схемы. Эти точки образуют выходные выводы ТВА, к которым подключена нагрузка 27. Принцип работы ТВА (рисунок 2.14) основан на двухкаскадной схеме, которые соединены параллельно. Каждый каскад содержит трансформаторный источник и вентиляющую схему выпрямления. Источники трансформаторные 1; 2, создают две шестифазные симметричные системы ЭДС, первичные обмотки которых состоят из двух частей сетевой  $w_c$  и фазосдвигающей  $w_\phi$  с соотношением чисел витков 1: ( $\sin 30^\circ + \sin 7^\circ 30'$ ).

Их соединение между собой по схеме «неравноплечий зигзаг» создает фазовый сдвиг  $15^\circ$  эл. градусов между шестифазными симметричными системами, формируемыми вторичными обмотками трансформаторов, которые размещены по две на каждом стержне трансформатора соотношением витковых чисел установленное как  $1:1/\sqrt{3}$ . Три обмотки имеющих большее число витков соединены

между собой в треугольник, а трех обмоток, имеющих меньшее число витков в звезду создает равенство величин линейных напряжений, складываемых из фазных напряжений и равный фазовый сдвиг в  $30^0$  эл. градусов.

С помощью принципа работы выпрямителя на (рисунке 2.14) и векторных диаграмм напряжений (рисунок 2.15) формируются результирующие напряжения которые создают последовательность соединения ВО и определяют цепи протекания выпрямленного тока для каждого из двадцатичетырех пульсаций, что показано в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Порядок работы вентильных обмоток и вентилях ТВА с параллельным соединением ТВМ

S1	$b_1c_1-z_1/bc-x$	D16, D23, D25/D4, D8, D14
S2	$bc-x/a_1c_1-z_1$	D4, D8, D14/D15, D23, D25
S3	$a_1c_1-z_1/bc-y$	D15, D23, D25/D4, D8, D13
S4	$bc-y/a_1c_1-x_1$	D4, D8, D13/D15, D23, D24
S5	$a_1c_1-x_1/ac-y$	D15, D23, D24/D3, D8, D13
S6	$ac-y/a_1b_1-x_1$	D3, D8, D13/D15, D19, D 24
S7	$a_1b_1-x_1/ac-z$	D15, D19, D 24/D3, D11, D13
S8	$ac-z/a_1b_1-y_1$	D3, D11, D13/D15, D22, D24
S9	$a_1b_1-y_1/ab-z$	D15, D22, D24/D3, D7, D13
S10	$ab-z/c_1b_1-y_1$	D3, D7, D13/D17, D22, D24
S11	$c_1b_1-y_1/ab-x$	D17, D22, D24/D3, D7, D12
S12	$ab-x/c_1b_1-z_1$	D3, D7, D12/D17, D22, D26
S13	$c_1b_1-z_1/cb-x$	D17, D22, D26/D5, D7, D12
S14	$cb-x/c_1a_1-z_1$	D5, D7, D12/D17, D18, D26
S15	$c_1a_1-z_1/cb-y$	D17, D18, D26/D5, D10, D12
S16	$cb-y/c_1a_1-x_1$	D5, D10, D12/D17, D21, D26
S17	$c_1a_1x_1/ca-y$	D17, D21, D26/D5, D6, D12
S18	$ca-y/b_1a_1-x_1$	D5, D6, D12/D16, D21, D26
S19	$b_1a_1-x_1/ca-z$	D16, D21, D26/D5, D6, D14
S20	$ca-z/b_1a_1-y_1$	D5, D6, D14/D16, D21, D25
S21	$b_1a_1-y_1/ba-z$	D16, D21, D25/D4, D6, D14
S22	$ba-z/b_1c_1-y_1$	D4, D6, D14/D16, D20, D25
S23	$b_1c_1-y_1/ba-x$	D16, D20, D25/D4, D9, D14
S24	$ba-x/b_1c_1-z_1$	D4, D9, D14/D16, D23, D25

В таблице определены индексы линейных напряжений формирующие пульсаций  $S_i$ , указаны номера вентилях участвующих под воздействием указанных напряжений из векторной диаграммы (рисунок 2.15) в процессе выпрямительного процесса. Системы напряжений по векторным диаграммам позволяют установить

порядок чередования рабочих интервалов симметричных систем шестифазных напряжений которые подключены к соответствующим вентильным конструкциям (рисунок 2.15).

Например, результирующее напряжение первой пульсации  $S_1$ , указанного в первом столбце таблицы, формируется из наибольших величин векторов линейных напряжений, индексы которых указаны во втором столбце таблицы, складываемых из векторов фазных напряжений  $bc^*x$ , подключенных к первой кольцевой схеме выпрямления. В третьем столбце приведены номера вентиля, включаемых при действии указанных напряжений, вентили -4, 8, 14 первой кольцевой схемы выпрямления. Далее нумерация вентиля в таблице соответствует порядку их включения в преобразовательный процесс. Исходя из алгоритма включения вентиля при идеальной коммутации (таблица 2.3), следует в цепи протекания тока нагрузки постоянно находится только три вентиля в каждом преобразовательном модуле. Исходя из условий независимости протекания процессов выпрямления в ТВС при их параллельном соединении, а также идентичности ТВМ в 24-х пульсовом ТВА с их параллельным соединением с ТВМ в 24-х пульсового ТВА при их последовательном соединении (рисунок 2.6). Воспользуемся полученным аналитическим описанием происходящих электромагнитных процессов в ТВМ при их параллельном соединении и проведем расчет основных технических характеристик для их параллельного соединения.

Из рисунка 2.15 с помощью векторных диаграмм определяем максимальное значение ( $U_{dmax}$ ) напряжения на выходе ТВА которое равно 3,346 о.е. в соответствии с топологическим размером обмотки звезды. Амплитуду фазного напряжения звезды возьмем за относительную единицу. Значение напряжения на холостом ходу  $U_{d0}^*$  среднее по известному соотношению, в котором  $p$  – пульсность определяем:

$$U_{d0}^* = u_{dmax}^* \cdot \frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p} = 3,346 \cdot 0,9886 = 3,308 \text{ о.е.}$$

Действующие значения напряжений на вентильных обмотках  $U_{2Y_{T1}}^*$  и  $U_{2\Delta_{T1}}^*$  можно отразить в относительных единицах, для этих целей их амплитудные значения

в относительных единицах  $(1,0; \sqrt{3})$  делим произведение  $\sqrt{2}$  на среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{d0T1}$  в о.е., и получаем:

$$U_{2Y_{T1}}^* = \frac{U_{2m_{T1}}^*}{U_{d0T1}^* \cdot \sqrt{2}} = \frac{1}{3,308 \cdot \sqrt{2}} = 0,214 \text{ о.е.}; \quad U_{2\Delta_{T1}}^* = \frac{1,732}{3,308 \cdot \sqrt{2}} = 0,37 \text{ о.е.}$$

Мощность всех обмоток звезды равна произведению действующих значений тока и напряжения [40, 41] по формуле:

$$S_{2Y_{T1}}^* = 3 \cdot I_{2Y_{T1}}^* \cdot U_{2Y_{T1}}^* = 3 \cdot 0,816 \cdot 0,214 = 0,524 \text{ о.е.},$$

вычислим мощность всех обмоток треугольника:

$$S_{2\Delta_{T1}}^* = 3 \cdot I_{2\Delta_{T1}}^* \cdot U_{2\Delta_{T1}}^* = 3 \cdot 0,4714 \cdot 0,37 = 0,523 \text{ о.е.}$$

Мощность вторичных обмоток определяется выражением:

$$S_{2T1}^* = S_{2\Delta_{T1}}^* + S_{2Y_{T1}}^* = 1,047 \text{ о.е.}$$

Полную мощность первичных обмоток определим в соответствии с [40, 41], по следующему выражению получим относительно мощности  $P_d$ :

$$S_1^* = \frac{1}{\frac{p}{\pi} \sin \frac{\pi}{p}} = 1,0115 \text{ о.е.}$$

Для определения типовой мощности первичных обмоток необходимо определить действующее значения тока и напряжения. Действующее значения тока уточним по временной диаграмме (рисунок 2.9) из нее следует  $I_{A1T1}^* = 1,576$ .

Действующие значения напряжений на обмотках  $U_{1Z_{T1}}^*$  выражаем в относительных единицах, тогда их амплитудные значения можно выразить в о.е. (1,115) с полученным значением производим арифметическое деление на произведение  $\sqrt{2}$  на среднее значение выпрямленного напряжения  $U_{d0T1}$  так же в о.е., это можно отобразить следующим выражением:

$$U_{1Z_{T1}}^* = \frac{U_{1m_{T1}}^*}{U_{d0T1}^* \cdot \sqrt{2}} = \frac{1,115}{3,308 \cdot \sqrt{2}} = 0,238 \text{ о.е.};$$



Так как первичная обмотка трансформатора соединена в «неравноплечий зигзаг» для создания фазового сдвига  $15^0$  эл. градусов между трансформаторами, то типовая мощность первичных обмоток для схемы зигзага согласно [18, 76] подставляем значения в (2. 13) и получим следующее значение:

$$S_{1Z_{T1}}^* = 3 \cdot I_{A1_{T1}}^* \cdot U_{1Z_{T1}}^* = 3 \cdot 1,576 \cdot 0,238 = 1,125.$$

Для получения типовой мощности одного трансформатора 1 в относительных единицах подставляем значения типовых мощностей первичных и вторичных обмоток в выражения(2.9):

$$S_{T1}^* = \frac{S_{1_{T1}}^* + S_{2_{T1}}^*}{2} = \frac{1,125 + 1,047}{2} = 1,086 \text{ о.е.}$$

Используя полученные результаты, рассчитаем общую типовую мощность трансформаторного оборудования в относительных единицах (коэффициент установленной мощности)  $S_T^*$  состоящая из типовых мощностей двух трансформаторов. Она определяется полусуммой мощностей обоих трансформаторов [40, 41] и составляет:

$$S_T^* = \frac{S_{T1}^* + S_{T2}^*}{2} = \frac{1,086 + 1,086}{2} = 1,086 \quad \text{или} \quad S_T = 1,086 \cdot P_d.$$

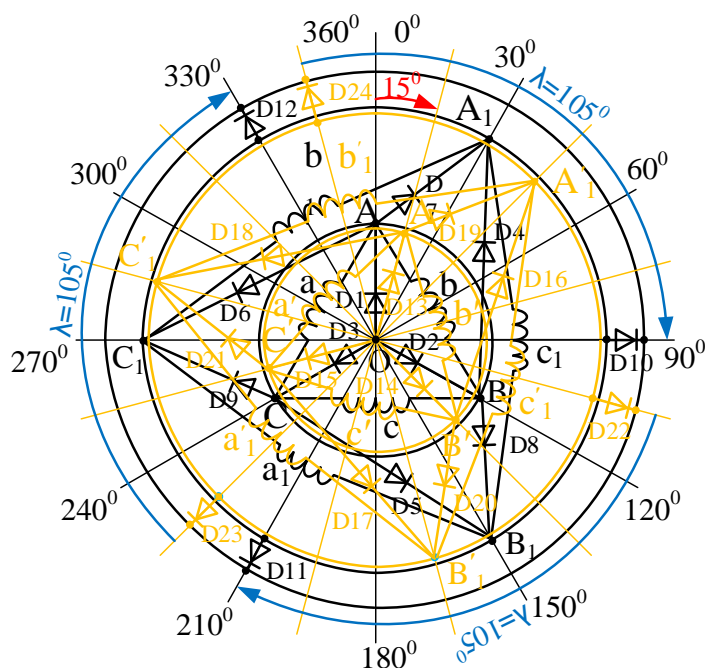
Для вентилях анодных и катодных групп максимальное значение рабочего обратного напряжения равно  $U_{обр \max}^* = U_{Л \max}^* = 1,732 \text{ о.е.}$

Для вентилях колец:

$$U_{обр \max}^*(p) = 2 \cdot U_{Л \max}^* \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{p}\right) = 2\sqrt{3} \sin\left(\frac{\pi}{3} + \frac{\pi}{12}\right) = 3,346 \text{ о.е.,}$$

Для определения углов проводимости вентилях (УПВ) данного 24-х импульсного ТВА воспользуемся фазо-аналитической методикой (ФАМ) используя последовательность действий построим вентиляно фазовый портрет (ВФП).

Для получения ВФП (рисунок 2.16, *a*) трансформируем схемное решение на ФП используя последовательность действий указанных в методике. Первую 12-ти пульсовую схему размещаем в центре ФП и ориентируем относительно нулевого градуса, вторую 12-ти пульсовую схему размещаем поверх первой с фазовым сдвигом  $15^0$  эл. град., а для графической дифференциации выделим ее оранжевым цветом.



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

Рисунок 2.16 – 24-х пульсовый ТВА на основе параллельного соединения 12-ти пульсовых ТВС с кольцевыми выпрямителями: *a* – ВФП ТВА; *b* – таблица УПВ ТВА

Обе схемы имеют общие места соединений это центральная точка  $O$  и внешние ПК схем объединены в одно ПК.

На основании проведенного анализа ВФП схемных решений установлено, что особенностью предложенного ТВА (рисунок 2.14) является параллельная работа ТВС осуществляется в моменты совпадения УП вентилей обоих схемных решений принадлежащих к общим точкам соединений это точка  $O$  и внешнее ПК. Анализ полученного ВФП (рисунок 2.16, *a*) показывает, что данное решение влияет на формирование углов проводимости вентилей сокращая УПВ на  $15^0$  эл. град. что вызвано фазовым сдвигом между ТВС, результаты приведены в таблице (рисунка 2.16, *b*). На основе полученных значений УПВ (рисунка 2.16, *b*) построена диаграмма работы вентилей 24-х пульсового модульного ТВА с параллельным соединением ТВС

(рисунок 2.17). использованием углов проводимости вентиляей (2.11) и (2.12) определяем анодные токи, также значения токов вентиляей действующие.

Определяем анодный ток вентиляей с углом проводимости  $105^0$  эл. град., анодно-катодной группы:

$$I_{a(АКГ)} = \frac{105}{360} \cdot I_d = \frac{7I_d}{24} \text{ А.}$$

Действующее значение тока вентиляей имеющих с углом проводимости  $105^0$  эл. град., анодно-катодной группы:

$$I_{ad(АКГ)} = \sqrt{\frac{105}{360}} \cdot I_d = \sqrt{\frac{7}{24}} I_d \text{ А.}$$

Анодный ток вентиляей с углом проводимости  $15^0$  эл. град., кольцевой группы:

$$I_{a(КГ)} = \frac{15}{360} \cdot I_d = \frac{I_d}{24} \text{ А.}$$

Действующее значение тока через указанные выше вентиляи:

$$I_{ad} = \sqrt{\frac{15}{360}} \cdot I_d = \frac{I_d}{\sqrt{24}} \text{ А.}$$

Для кольцевой группы с углом проводимости  $75^0$  эл. град., анодный ток вентиляей составляет:

$$I_{a(КГ)} = \frac{75}{360} \cdot I_d = \frac{I_d}{4,8} \text{ А.}$$

Действующее значение тока через указанные выше вентиляи:

$$I_{ad(КГ)} = \sqrt{\frac{75}{360}} \cdot I_d = \frac{I_d}{\sqrt{4,8}} \text{ А.}$$

Результаты исследования ТВА с последовательным и параллельным соединением идентичных 12-ти пульсовых кольцевых ТВМ показывают, что их магнитные системы уравновешенны, а выпрямленное напряжение обоих ТВА имеет 24 пульсации.

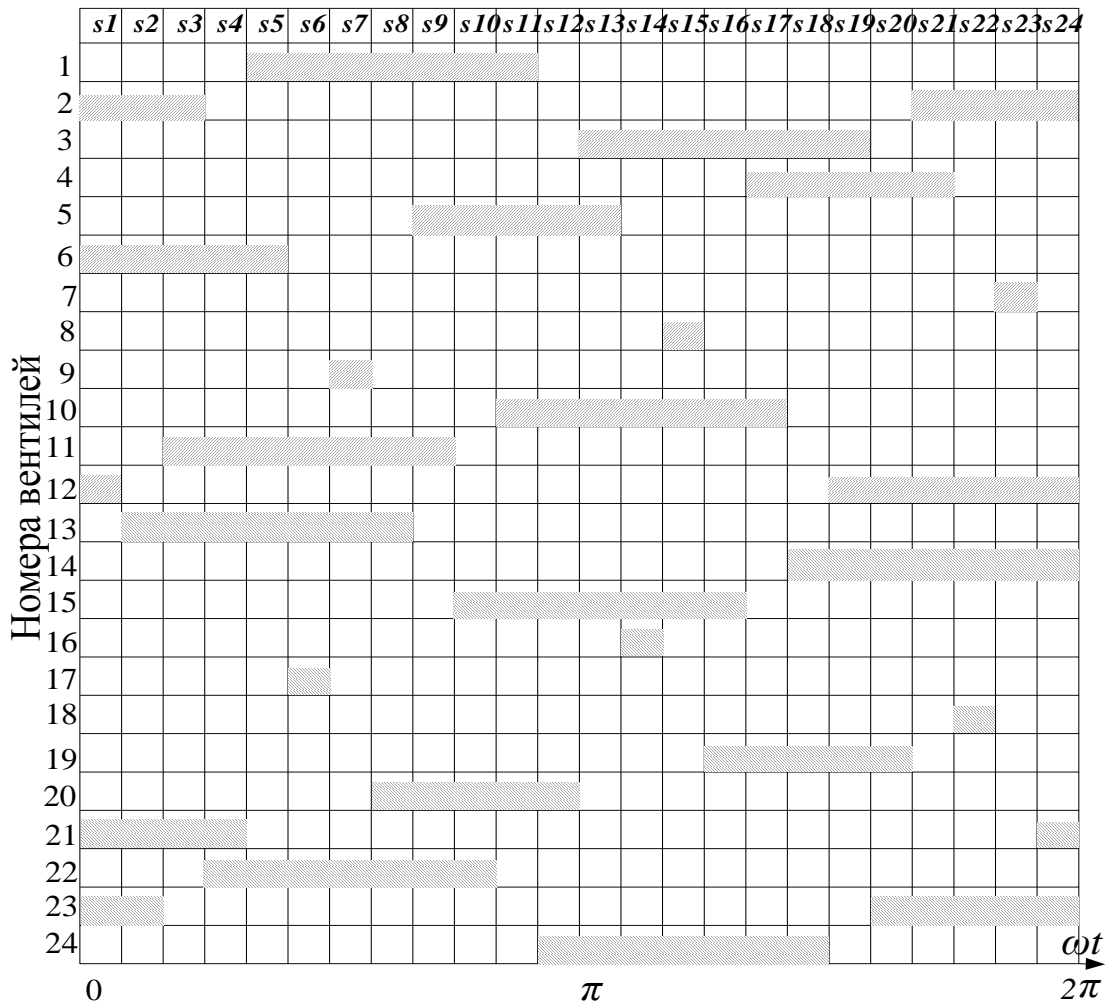


Рисунок 2.17 – Последовательность работы вентиляей 24-х пульсового ТВА с параллельным соединением ТВМ при идеальной коммутации

В схемном решении с последовательным соединением ТВМ где в любой момент времени в цепи последовательно обтекаются током нагрузки шесть вентиляей, а в схеме с последовательным соединением ТВМ обеспечивают сокращение числа вентиляей, при этом ток нагрузки течет по двум параллельным ветвям, содержащих по три вентиля одной схемы и три вентиля другой схемы.

Такое схемотехническое решение ведет к уменьшению количества вентиляей в цепи тока нагрузки с шести вентиляей до трех, что снижает потери мощности в данной вентиляйной конструкции, а в сравнении с известной мостовой последовательно-параллельного типа схемой на рисунок 1.12 [45], где последовательно в цепи протекания тока нагрузки участвуют четыре вентиля,

позволяет снизить их на 25%, увеличив тем самым КПД преобразователя в целом, не менее, чем на 0,25%.

Основные технические характеристики исследованных схемотехнических решений ТВА представлены в таблице 2.4 и сопоставлены с данными 24-х пульсового выпрямителя находящегося в эксплуатации. 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 вентиляльной структуры схемного решения с параллельным соединением ТВМ на 25%.

Таблица 2.4 – Технические параметры 24-х пульсовых ТВА

Схемные решения 24-х пульсовых ТВА								
Параметры		Типы соединения кольцевых модулей						Мостовая посл-пар
		последовательное			параллельное			
трансформа торов	$S_T/P_d$	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 <sup>0</sup>	90 <sup>0</sup>	120 <sup>0</sup>	15 <sup>0</sup>	75 <sup>0</sup>	105 <sup>0</sup>	120 <sup>0</sup>
	$N_B$	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

Технические параметры модульных 24-х пульсовых схемотехнических решений, представленные в (таблица 2.4) показывают, 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.

Так в настоящее время для тяговых подстанций постоянного тока магистральных железных дорог используется серийно выпускаемый один тип

выпрямителя ТРДП-12500 с номинальным током 3150 А и номинальной мощностью 11,4 МВ·А. Например за рубежом используются номинальные мощности ТВА тяговых подстанций магистральных электрических железных дорог значительно меньше отечественных. Так на высокоскоростных магистралях Испании используется номинальная мощность выпрямителей равной 3 и 6 МВ·А из которых собираются различные комбинации мощностей. Важным показателем загруженности тяговых подстанций является коэффициент использования установленной мощности ТВА, представляющий собой отношение средней потребляемой за сутки мощности к установленной с учетом резервной. По данным министерства путей сообщений РФ средний коэффициент использования установленной мощности ТВА в 1991 г. по сети дорог был равен 0,12. ТВА находящиеся в эксплуатации были загружены на одну треть своей мощности около 30 %. Коэффициент использования, на 85 % тяговых подстанций постоянного тока сети железных дорог, составляет значения около 0,1...0,25. Такая ситуация приводит к ненужным эксплуатационным расходам и неоправданным затратам. Проведенный анализ нагрузочных режимов в [119, 120] показывает о необходимости разработки для ТВА ТП широкой шкалы номинальных мощностей. Для реализации такой шкалы номинальных мощностей был разработан преобразовательный трансформатор ТРМП-6300/35ЖУ1 который в составе с 12-ти пульсовой мостовой схемой выпрямления последовательного типа образовал ТВА пониженной мощности, который позволил значительно повысить технико-экономические показатели (снижены потери холостого хода, короткого замыкания и напряжения короткого замыкания трансформатора), такие мероприятия снизили потери электрической энергии около 100 тыс. кВт·ч в год на одной тяговой подстанции, также позволило снизить расход электротехнических материалов на одну ТП порядка 40 % [2]. Аналогичный эффект можно получить использованием разработанного 24-х пульсового модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ на ТП мощностью 12600 кВт. Который позволяет снизить значение мощности ТВА ТП путем включения в рабочий режим не двух, а только одного ТВМ при этом значение мощности снижается до 6300 кВт при этом выпрямленное напряжение становится 12-ти пульсовым. Такой ТВА позволяет повысить коэффициент

использования установленной мощности ТП при этом улучшаются его технико-экономические показатели (происходит снижение нагрузочных потерь и холостого хода трансформаторного оборудования), такие мероприятия сокращают потери электрической энергии на указанных элементах для одной тяговой подстанции около 100 тыс. кВт-ч в год.

### **2.3 Анализ режимов работы вентиляей модульных трансформаторно-выпрямительных агрегатов с кольцевыми вентиляными схемами**

Учет пульсаций анодных и обратных напряжений в вентилях имел большое значение при использовании ртутных (газоразрядных) вентиляей приводящие к непреднамеренным зажиганиям, а также учета вероятности появления обратных зажиганий. Но с появлением силовых полупроводниковых приборов (СПП) актуальность значений анодного тока и анодных напряжений не уменьшилось, то есть возникают вопросы какие воздействия должен выдержать полупроводниковый вентиль в рабочем процессе выпрямителя. При проектировании ТВА подбор необходимых вентиляей производится или проектируется с учетом необходимых значений анодного напряжения и анодного тока.

Проведенный анализ кольцевых схемных решений с участием автора [82-83], показывает, что изменения углов проводимости вентиляей из которых состоит кольцевая группа рассматриваемых выпрямителей, рассматривается на предмет применения в кольцевой схеме перспективной, также имеющейся в эксплуатации элементной базы СПП.

Время - токовые характеристики (ВТХ) типовой схемных решений в тяговой нагрузке исследуем на основе характеристик из [85-89], для СПП диодов ДЛ133-500, используемых в вентилях ТВА ТП постоянного тока (рисунок 2.18).

Благоприятный режим работы вентиляных блоков по рекомендации заводов изготовителей это однофазная однополупериодная схема выпрямления с чисто активной нагрузкой с углом проводимости  $180^0$  эл. град., при этом питание синусоидальной формой частотой 50 Гц.

Большинство выпрямителей в тяговой сети, изготовлены по мостовым решениям в многофазных ТВА, что работу вентильных плеч только с углами проводимости  $120^0$  эл. град.

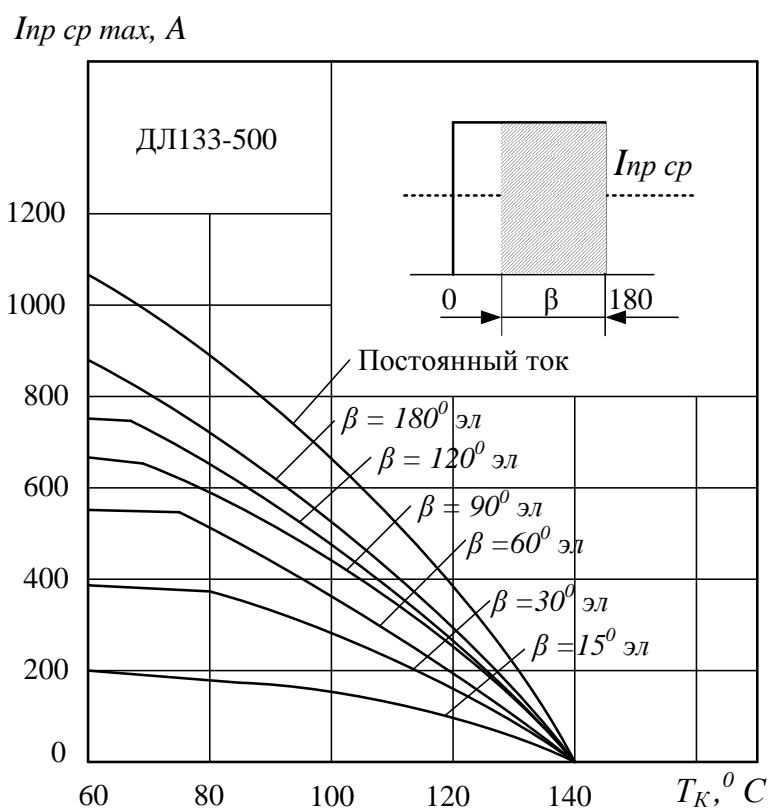


Рисунок 2.18 – Времятоковые характеристики диода ДЛ133-500

Если принимать во внимание, что в тяговой нагрузке ток сглаживается дополнительным реактором обладающего большой индуктивностью, то через вентильные плечи протекает ток имеющий прямоугольную форму, а амплитуда этого импульса равна среднему значению выпрямленного тока ( $I_d$ ). В нашем случае показаны зависимости имеющие несколько значений углов проводимости диодов (рисунок 2.18), а также и для постоянного тока. Максимальные значения прямого среднего тока достигается при значительных углах проводимости близких к постоянному току и при постоянном токе. Если происходит снижение углов проводимости, то прямой средний ток снижается. В соответствии с [33, 34, 93], а также данных из рисунка 2.18 следует, что при температуре диода,  $100^0C$ , а угол проводимости составляет  $180^0$  эл. град., то максимально допустимый прямой ток ограничен значением 900 А.



Максимально допустимый прямой ток диодов при температуре корпуса  $T_k = 100^\circ\text{C}$  в мостовых схемах при  $\beta = 120^\circ$  эл. град. будет равен приблизительно 450 А, в этом случае для прямоугольных форм он составляет :

$$I_{ad}(180^\circ) = \sqrt{\frac{180}{360}} \cdot I_{np.cp.max} = 0,707 \cdot I_{np.cp.max} = 0,707 \cdot 560 = 395 \text{ A};$$

$$I_{ad}(120^\circ) = \sqrt{\frac{120}{360}} \cdot I_{np.cp.max} = 0,577 \cdot I_{np.cp.max} = 0,577 \cdot 450 = 260 \text{ A}.$$

$$I_{ad}(105^\circ) = \sqrt{\frac{105}{360}} \cdot I_{np.cp.max} = \frac{7}{24} \cdot I_{np.cp.max} = \frac{7}{24} \cdot 350 = 102 \text{ A}$$

Диоды анодной и катодной групп ТВА с последовательным включением ТВМ работают  $120^\circ$  эл. град., а ТВА с параллельным включением ТВМ это значение составляет  $105^\circ$  эл. град., обеспечивая тоже соотношение 1,0 : 0,577 для среднего и действующего значений токов которые является стандартом для мостовых схем с активно-индуктивной нагрузкой включая сглаживающий реактор (индуктивным).

Кольцевая группа диодов с углами проводимости одного схемного решения 90, 30 и второго 75, 15 эл. град., по значениям в графиком на рисунке 2.18 характеризуются ограничениями при температуре корпуса диода  $T_k = 100^\circ\text{C}$  максимальных прямых токов значениями первого решения 400 А, 250 А и второго 350 А, 170 А соответственно.

Действующие значения токов при этом:

$$I_{ad}(90^\circ) = \sqrt{\frac{90}{360}} \cdot I_{np.cp.max} = 0,5 \cdot I_{np.cp.max} = 0,5 \cdot 350 = 175 \text{ A};$$

$$I_{ad}(75^\circ) = \sqrt{\frac{75}{360}} \cdot I_{np.cp.max} = \frac{5}{24} \cdot I_{np.cp.max} = \frac{5}{24} \cdot 350 = 73 \text{ A};$$

$$I_{ad}(30^\circ) = \sqrt{\frac{30}{360}} \cdot I_{np.cp.max} = 0,288 \cdot I_{np.cp.max} = 0,288 \cdot 250 = 72 \text{ A};$$

$$I_{ad}(15^\circ) = \sqrt{\frac{15}{360}} \cdot I_{np.cp.max} = 0,204 \cdot I_{np.cp.max} = 0,204 \cdot 170 = 35 \text{ A}$$

Через каждый диод протекает анодный ток при номинальном значении выпрямленного тока  $I_{d \text{ ном}} = 3150 \text{ A}$ , а также шести ветвях диодов в вентильном плече выпрямителя ТПЕД-3150-3,3к, который равен:

$$I_a(120^0) = \frac{\beta \cdot I_{d \text{ ном}}}{360 \cdot 6} = \frac{120 \cdot 3150}{360 \cdot 6} = 175 \text{ A};$$

$$I_a(90^0) = \frac{\beta \cdot I_{d \text{ ном}}}{360 \cdot 6} = \frac{90 \cdot 3150}{360 \cdot 6} = 131,25 \text{ A};$$

$$I_a(30^0) = \frac{\beta \cdot I_{d \text{ ном}}}{360 \cdot 6} = \frac{30 \cdot 3150}{360 \cdot 6} = 43,75 \text{ A};$$

$$I_a(15^0) = \frac{\beta \cdot I_{d \text{ ном}}}{360 \cdot 6} = \frac{15 \cdot 3150}{360 \cdot 6} = 21,87 \text{ A}.$$

Полученные значения меньше допустимых значений по справочным данным и также не превышают величин, определенных по графикам рисунок 2.18, взятому из того же источника данных [89, 90]. Это доказывает, что уменьшение УПВ позволяет сократить токовую нагрузку в вентильных плечах так например в кольцевых вентильных плечах что приведет к снижению тепловых потерь.

На основе полученных значений токов вентилей действующего  $I_d^{(\lambda)}$  и среднего  $I_{cp}^{(\lambda)}$  в зависимости от угла проводимости вентилей можно провести расчеты потерь энергии в вентильных плечах зависимости от  $\lambda$  каждого вентиля учитывая, что  $L \rightarrow \infty$  в цепи выпрямленного тока:

$$\Delta P_{di} = R_d \cdot \left( \frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i(t) d(t) \right)^2 + E_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i^2(t) d(t)}; \quad (2.16)$$

суммарные потери в вентильных плечах для 24-х импульсного схемного решения в зависимости от их  $\lambda$  определены выражением:

$$\Delta P_{\Sigma di} = \sum_{i=1}^{24} \left[ R_d \cdot \left( \frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i(t) d(t) \right)^2 + E_0 \cdot \sqrt{\frac{1}{\lambda_i} \int_0^{\lambda_i} i^2(t) d(t)} \right]; \quad (2.17)$$

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

$$\eta = \frac{P_d}{\Delta P_{\Sigma di} + P_d}. \quad (2.18)$$

Проведенные вычислительные эксперименты с использованием выражений (2.16, 2.17, 2.18) показывают, что снижение потерь энергии в вентилях вызываемые уменьшением УПВ в предложенных ТВА, приводят к увеличению их КПД в сравнении с существующим 24-х пульсовым выпрямителем в пределах 0,25 – 0,38 %

В завершении анализа кольцевых выпрямителей необходимо отметить, что первичный анализ показывает, что уменьшение потерь в вентильной схеме происходит не только из-за сокращения числа вентильных плеч в цепи выпрямляемого тока нагрузки но и снижения тепловых потерь на вентилях при уменьшении углов проводимости вентиляей.

## Выводы по главе 2

1. Разработана методика устанавливающая взаимосвязь фазовых структур вентиляей ,ВО и определяющая углы проводимости комбинированных многопульсовых ТВА с параллельным соединением ТВС и кольцевыми вентильными структурами.

2. Анализ электромагнитных процессов подтвердил идентичность кольцевых ТВМ используемых в 24-х пульсовых ТВА, что предопределяет возможность их параллельной работы без применения УР.

3. 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 однотономатормным ТВА находящимся в эксплуатации

4. Применение кольцевых вентильных схем в модульном 24-х пульсовом ТВА с параллельным соединением ТВМ сокращает число вентильных плеч последовательно обтекаемых током нагрузки, что повышает КПД вентильной структуры на 25%. в сравнении действующим мостовым 24-х пульсовым выпрямителем;

5. Модульные 24-х пульсовые ТВА с кольцевыми вентильными схемами сокращают суммарные тепловые потери в вентильных плечах, что обуславливает сокращение потерь мощности в них на 25 - 37% в сравнении с известным мостовым 24-х пульсовым выпрямителем.

6. Предложенные 24-х пульсовые ТВА с последовательным соединением 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.

7. Модульный ТВА с параллельным соединением ТВМ, позволяет снижая номинальную мощность работой на одном модуле в 12-ти пульсовой режиме, повысить коэффициент использования установленной мощности и сократить потери электрической энергии более 100 тыс. кВт-ч в год.

### **Глава 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХ ПУЛЬСОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ МОДУЛЬНОГО ТИПА С КОЛЬЦЕВЫМИ ВЕНТИЛЬНЫМИ СХЕМАМИ**

#### **3.1 Исследование на компьютерных моделях в среде Matlab/Simulink**

Предложенные в предыдущей главе 2 математические модели исследуемых ТВА позволили получить аналитическое описание происходящих в них электромагнитных процессов. Которые позволяют с теоретической точки зрения понимать процессы происходящие в рассматриваемых устройств. Необходимо для практической реализации схем требуется выполнить анализ процессов в схемотехнических решениях при различных параметрах нагрузки ТВА, которые имеют место в условиях эксплуатации. Реальные физические эксперименты в настоящее время очень громоздки требующих различного дорогостоящего технологического оборудования и соответственно затруднительны, поэтому компьютерное моделирование упрощает и облегчает это процесс [91]. Этот метод исследования сложных динамических систем является эффективным и широко распространен в отраслях науки и техники. Эксперименты на компьютерных моделях позволяют исследовать сложные модели, в которых полно и точно исследуются происходящие процессы.

При исследовании и анализе новых выпрямителей, в силу общности законов коммутации можно использовать теоретическую базу, изложенной в фундаментальных трудах [18, 74-75], предназначенных трехфазных выпрямителей, а также в трудах по исследованию многофазные мостовые выпрямители. Получению расчетных выражений схемотехнических решений выпрямителей посвящено множество работ [2, 74-76]. Расчеты прикладного значения проводимые для ТВА ТП проводились в следующих работах [49, 92-94]. Известно, что имеющиеся нелинейные электрические характеристики параметров элементов схем ных решений необходимо учитывать. Это приводит к громоздким аналитическим выражениям, что усложняет сопоставление технико-энергетических показателей и характеристик многопульсных выпрямителей. Для упрощения соотношений между различными электрическими и

технологическими величинами схемотехнических решений многопульсных выпрямителей необходимы допущения позволяющие с определенной достоверностью упростить качественные и количественные характеристики преобразовательных процессов, что позволяет не использовать сложные математические вычисления [74-75, 95].

Анализ зависимостей токов и напряжений в зависимости схемотехнических решений выпрямителей с новыми подходами в топологическом построении на в первую очередь приводятся основные допущения первого приближения аналитических исследований [18, 46, 74-75]:

1. трансформатор – «идеальный» (активные сопротивления обмоток равны нулю и индуктивные сопротивления сосредоточены в ВО);
2. вентили – «идеальные» (нулевое падение напряжения как в прямом направлении так и нулевым обратным током, вентиль открывается сразу, при достижении потенциала анода выше потенциала катода);
3. напряжения питающие модели симметричны и синусоидальны;
4. выходная индуктивность (сглаживающая) стремиться к бесконечности.

Указанные допущения позволяют оперативно сопоставлять схемные решения и проводить сравнительную оценку схем различных выпрямителей по их основным показателям.

В пакете прикладных программ MATLAB Simulink были построены модели преобразователей, предназначенные для проверки результатов анализа электромагнитных процессов. Основные расчётные соотношения для определения параметров трансформатора и вентильной части преобразователей взяты из таблицы 2.2.

При расчетах на компьютерных моделях использованы следующие характеристики преобразовательного агрегата [96]. Принят за основу 12-ти пульсовый выпрямитель с параллельным соединением шести фазных мостов на баз преобразовательного трансформатора ТРДП–12500/10ЖУ1 характеристики которого представляют собой: мощность сетевых обмоток  $S_{НОМ Т} = 11400$  кВ·А; потери холостого хода  $\Delta P_{ХХ Т} = 15,0$  кВт; потери короткого замыкания  $\Delta P_{КЗ Т} = 64,5$  кВт;

напряжение короткого замыкания  $u_{KT} = 8 \%$ ,  $I_{xx} = 1,1$ . Оснащенного выпрямительным агрегатом ТПЕД – 3150 – 3,3К – У1 на основе диодов ДП133-500 -14 вентильные плечи имеют  $s = 8$  и  $a = 3$  [15,146]. Выпрямитель нагружает понизительный трансформатор ТДН – 16000/110 с характеристиками [15,163]: мощность  $S_{НОМ П} = 16000$  кВ·А; потерь короткого замыкания  $\Delta P_{КЗ П} = 86$  кВт; потерь холостого хода  $\Delta P_{ХХ П} = 21,0$  кВт; напряжения короткого замыкания  $u_K = 10,5 \%$ .

Основные характеристики выпрямительной установки: выпрямленный ток  $I_d_{НОМ} = 3150$  А; выпрямленное напряжение  $U_d_{НОМ} = 3300$  В [86], напряжение холостого хода определенное ранее которое составляет  $U_{d0} = 3522$  В.

Модель 12-ти пульсового ТВМ кольцевого типа является самостоятельным функциональным элементом и предназначена в качестве базового составного модуля для 24-х пульсовых ТВА с последовательным и параллельным соединением ТВМ, отображена на рисунке 3.1. Данная модель предназначена для проверки результатов анализа электромагнитных процессов, проходящих в 12-ти пульсовом ТВМ с кольцевой вентильной схемой полученных во второй главе. Таким образом результаты имитационного моделирования электромагнитных процессов представят собой значения напряжений, токов ВО и выпрямленных напряжений и токов, также временные диаграммы отражающие обратные напряжения и углы проводимости вентиляей.

### **3.1.1 Результаты исследований двенадцати пульсового трансформаторно-выпрямительного модуля**

Исследования проведенные на разработанной компьютерной модели (рисунок 3.1) показали, что форма выпрямленного напряжения имеет 12 пульсаций (рисунок 3.2, а) за период сетевого напряжения. Значения напряжений и токов  $U_{2Y}/U_{d0}$ ;  $U_{2\Delta}/U_{d0}$ ;  $I_{2Y}/I_d$ ;  $I_{2\Delta}/I$ ; характеризующие отношения фазных напряжений и токов ВО и средними значениями выпрямленного тока и напряжения, соответствуют значениям таблицы 2.4, которые определены теоретическими исследованиями во второй главе и соответственно составляют 0,214; 0,37; 0,816; 0,4714.

Амплитуда и форма обратных напряжений вентилях анодных и катодных групп, отображенных на (рисунке 3.2, б, в, г) которые по форме и амплитудам обратных напряжений аналогичны мостовым схемам в [5, 8]. Анодно-катодные и кольцевые группы углы проводимости вентилях которых отобраны на: (рисунке 3.2, б)  $-120^{\circ}$  эл. град., (рисунке 3.2, в)  $-90^{\circ}$  эл. град., (рисунке 3.2, г)  $-30^{\circ}$  эл. град..

Одновременно проверена достоверность фазо-аналитической методики по определению углов проводимости вентилях кольцевых групп и анодно-катодных которая представлена описана в предыдущей главе диссертационной работы.

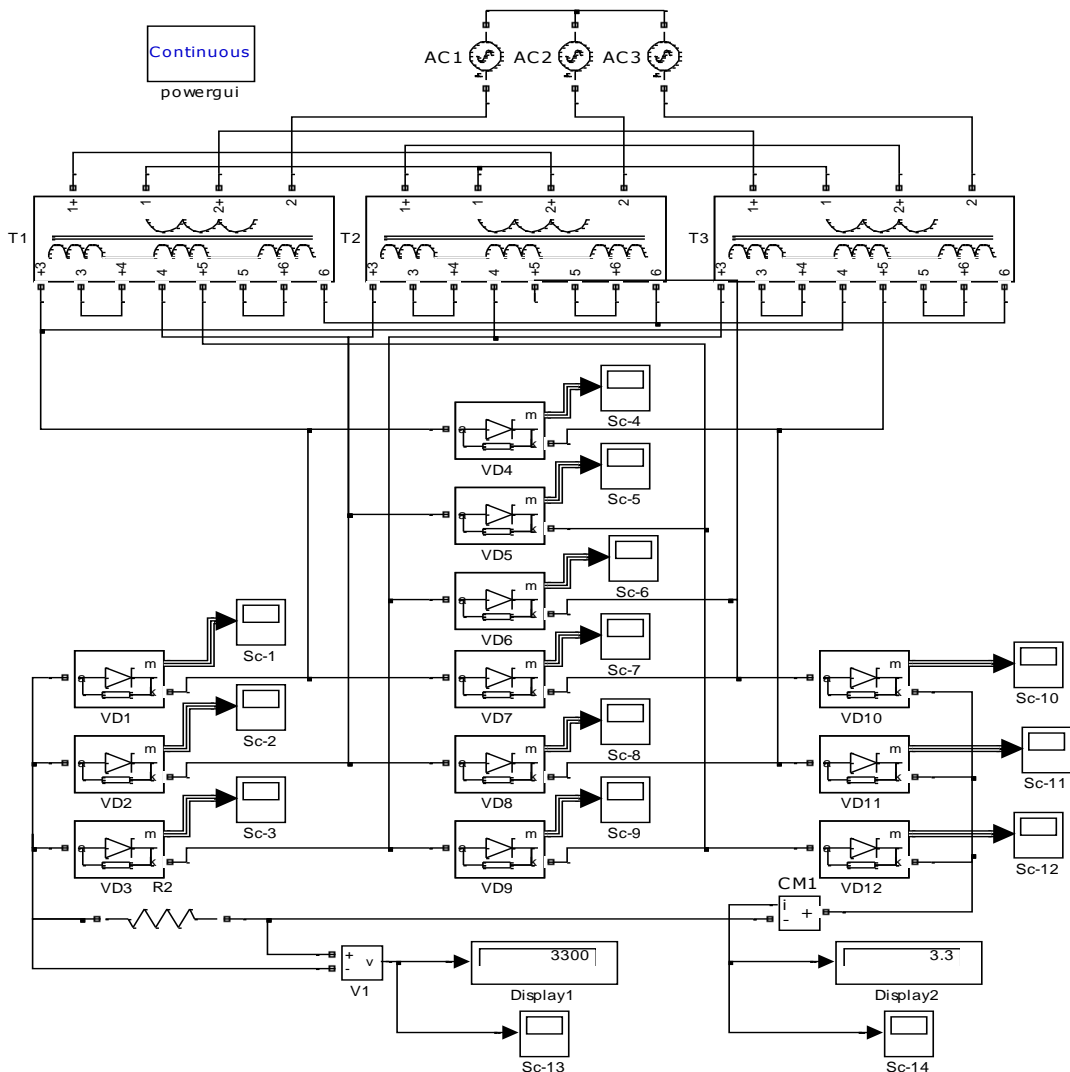


Рисунок 3.1 – Компьютерная модель 12-ти пульсового ТВМ с кольцевой схемой

В соответствии с описанным правилом на рисунке 2.6, в фаза «*a-b*» соединяется с фазой «*a'*» посредством вентиля имеющего угол проводимости  $30^{\circ}$  эл. град., это доказываются эюрой напряжения вентиля D5 на (рисунке 3.2, г).



Углы проводимости по номерам вентилях определены и приведены на (рисунке 3.2, б, в, г). Суммарное время проводимости вентилях кольцевой группы, как следует из диаграмм на (рисунке 3.2, в, г), показало уменьшение, в сравнении с вентилями анодных и катодных группы отображенных на (рисунке 3.2, б), в 2 раза. Следовательно в вентилях кольцевой группы мощность потерь снижается примерно в 2 раза, а по отношению ко всей вентилях схеме снижается на 25%.

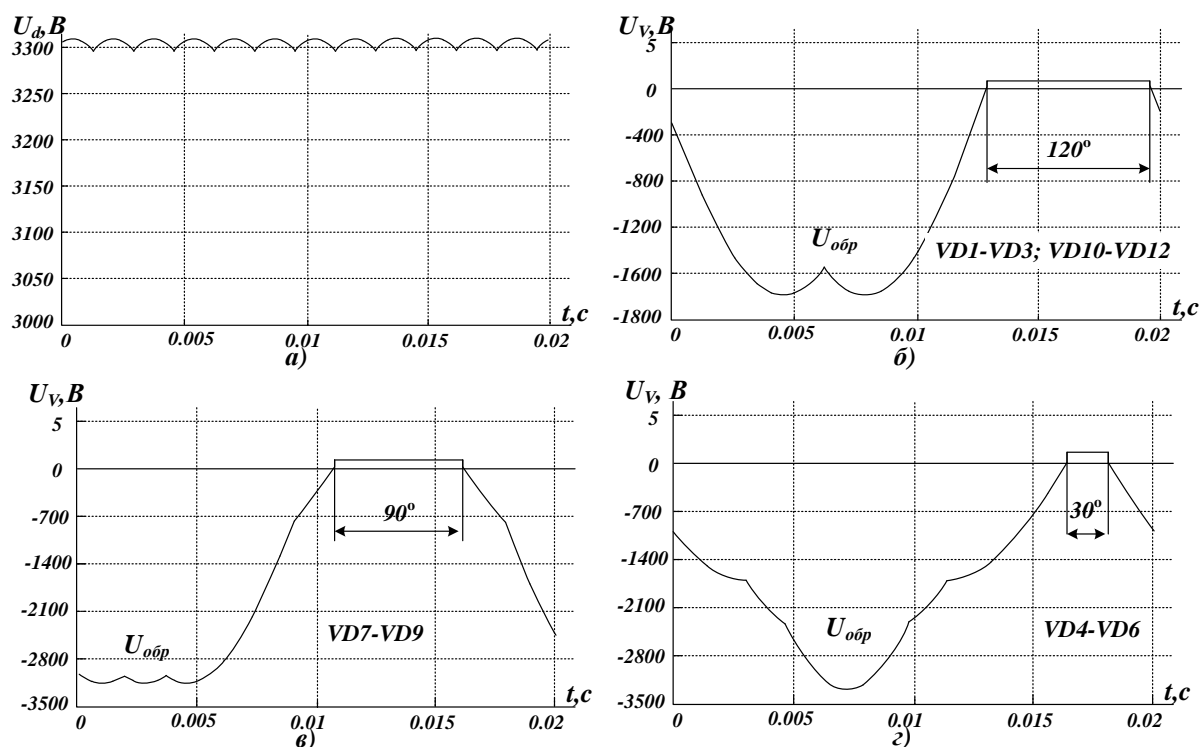


Рисунок 3.2 – Временные диаграммы напряжений компьютерной модели 12-ти пульсового ТВМ: а – выпрямленного  $U_d$ ; б – вентилях анодно-катодной группы ( $120^\circ$ ); в – вентилях кольцевой группы ( $90^\circ$ ); г – вентилях кольцевой группы ( $30^\circ$ )

Выпрямленный ток при номинальной нагрузке по форме кривой и количеству пульсаций, представленный на (рисунке 3.3, а), соответствует форме и количеству пульсаций выпрямленного напряжения на (рисунке 3.2 а). При этом кривая потребляемого ТВМ тока на (рисунке 3.3, б) содержит 12 ступеней, а ее форма близка к синусоидальной. Это приводит к лучшей электромагнитной совместимости потребителя с питающей трёхфазной сетью и снижению потерь, так как приводит к снижению гармонического состава по сравнению с формой

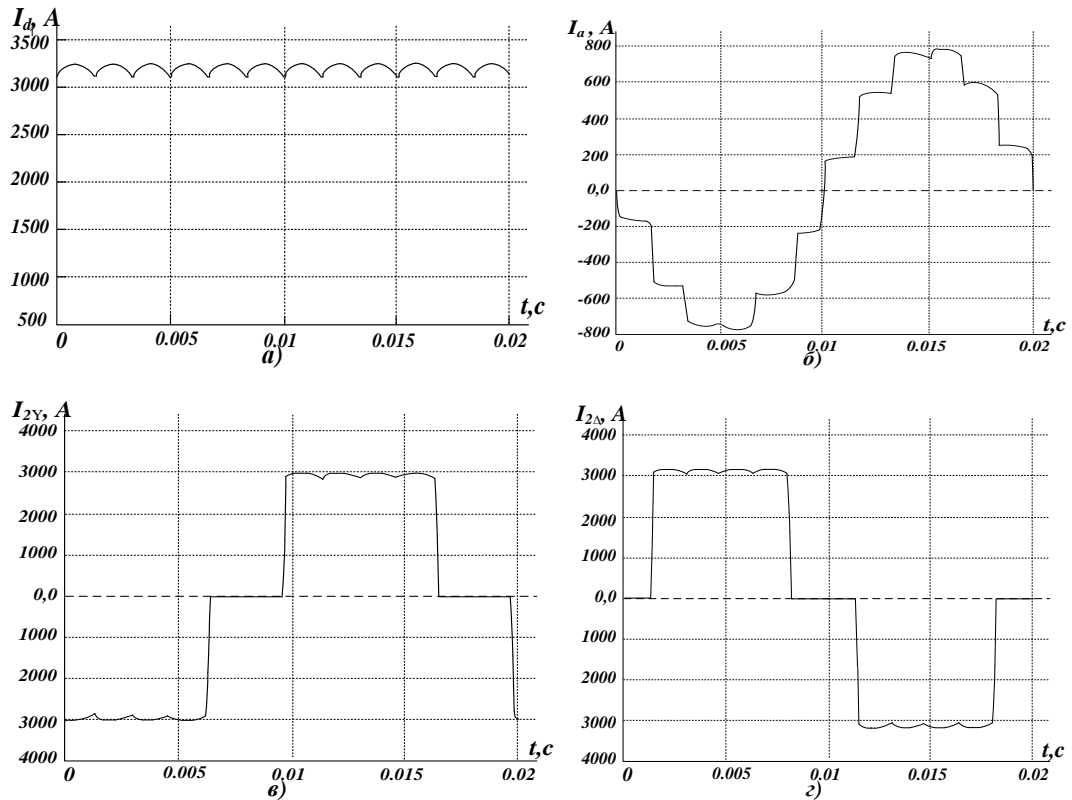


Рисунок 3.3 – Временные диаграммы токов компьютерной модели 12-ти пульсового ТВМ: *a* – выпрямленного  $I_d$ ; *б* – тока трехфазной сети  $I_A$ ; *в* – ВО «звезда»; *д*) – ВО «треугольник»

потребляемого тока шестипульсовых преобразователей [31, 113]. Амплитуды токов вентиляльных обмоток «звезда» и «треугольник», отображенных на (рисунке 3.3, г, д), равны действующему току  $I_d$  и представляют собой пульсации прямоугольной формы, вершины которых промодулированы четырьмя пульсациями. Результаты исследования гармонического состава потребляемого тока ТВМ отображены на рисунке 3.4.

Из чего следует, что общее гармоническое искажение сетевого тока по сравнению с 12-ти пульсовым мостовым ТВА в [51, 113] уменьшилось с 11.19% до 10.56%. При этом амплитуды 11-ой и 13-ой гармоник в обоих ТВА отличаются незначительно друг от друга и составляют в мостовом 59.40% и 30.03%, а в кольцевом 53.03% и 39.97% соответственно.

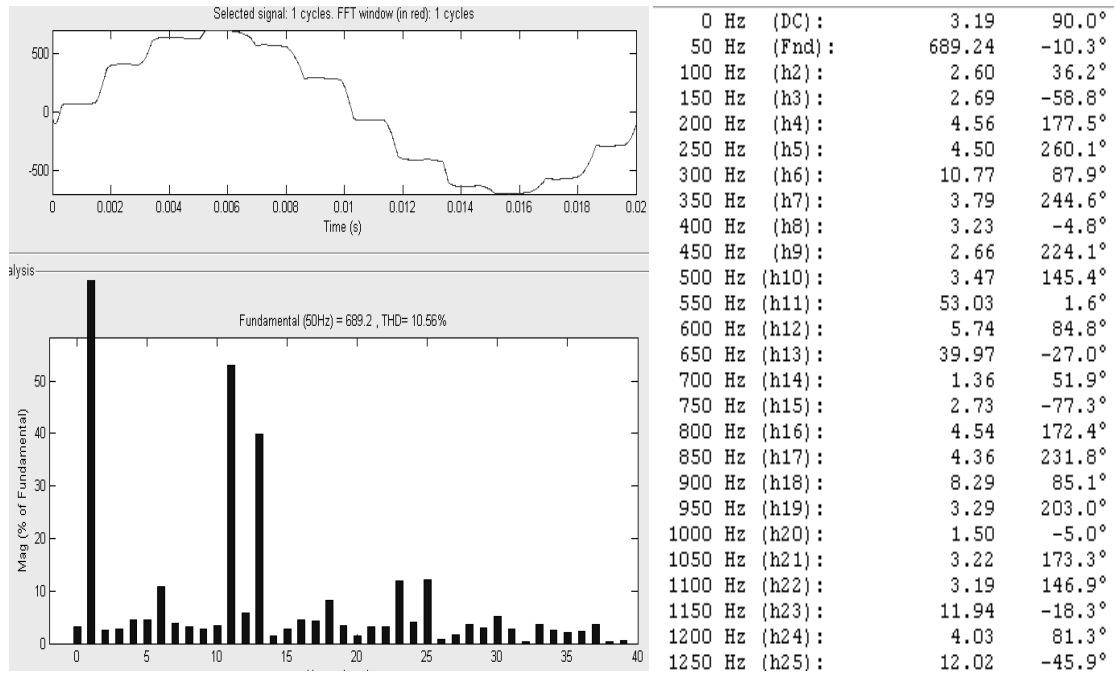


Рисунок 3.4 – Состав гармоник тока в трехфазной сети компьютерной модели 12-ти пульсового ТВМ

Гармонический состав выпрямленного тока выпрямителя представлен на рисунке 3.5. Из него следует, что общее гармоническое искажение действующего тока

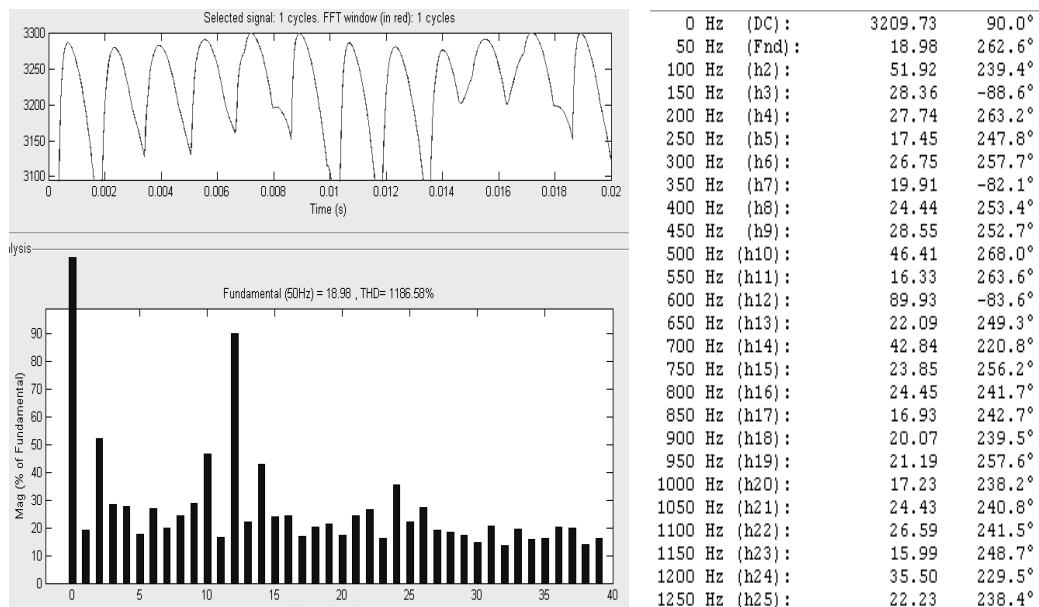


Рисунок 3.5 – Состав гармоник в выпрямленном токе компьютерной модели 12-ти пульсового ТВМ

по сравнению с 12-ти пульсовым мостовым ТВА в [51, 113] практически не изменилось и составляет в мостовом 27.40% а в кольцевом 22.56%. При этом

амплитуда 12-ой гармоники составляют в мостовом преобразователе 95.12%, а в кольцевом 89.93%.

На базе 12-ти пульсового ТВМ с кольцевой вентильной схемой были разработаны компьютерные модели 24-х пульсовых модульных ТВА с последовательным и параллельным соединением ТВМ представленных на рисунке 3.6 и рисунке 3.11 соответственно[45, 67].

### **3.1.2 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с последовательным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей**

Результаты исследований модели 24-х пульсового модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ приведены на рисунке 3.7, рисунке 3.8, рисунке 3.9 и рисунке 3.10. Исследования показали, что форма кривой выпрямленного напряжения имеет 24 пульсаций, которые отображены на (рисунке 3.7, а) за период сетевого напряжения. Значения напряжений и токов  $U_{2Y}/U_{do}$ ;  $U_{2\Delta}/U_{do}$ ;  $I_{2Y}/I_d$ ;  $I_{2\Delta}/I$ ; характеризующие отношения фазных напряжений и токов ВО и средними значениями выпрямленного тока и напряжения, соответствуют значениям таблицы 2.4, определенных теоретическими исследованиями во второй главе. Форма обратных напряжений вентилях анодно-катодных и кольцевых групп, отображенных на (рисунке 3.7, б, в, г) аналогичны формам обратных напряжений 12-ти пульсового кольцевого ТВМ, но их амплитуда меньше в два раза. Обратные напряжения вентилях анодно-катодных и кольцевых групп имеют три формы кривых при этом углы проводимости составили для первой группы –  $120^0$  эл. град. (рисунок 3.7, б), для второй группы –  $90^0$  эл. град. (рисунок 3.7, в), и для третьей группы –  $90^0$  эл. град. (рисунок 3.7, г). Углы проводимости вентилях определенные на компьютерной модели подтвердили достоверность и справедливость предложенной фазо-аналитической методики определения принадлежности вентилях различной проводимости анодно-катодных и кольцевой групп.

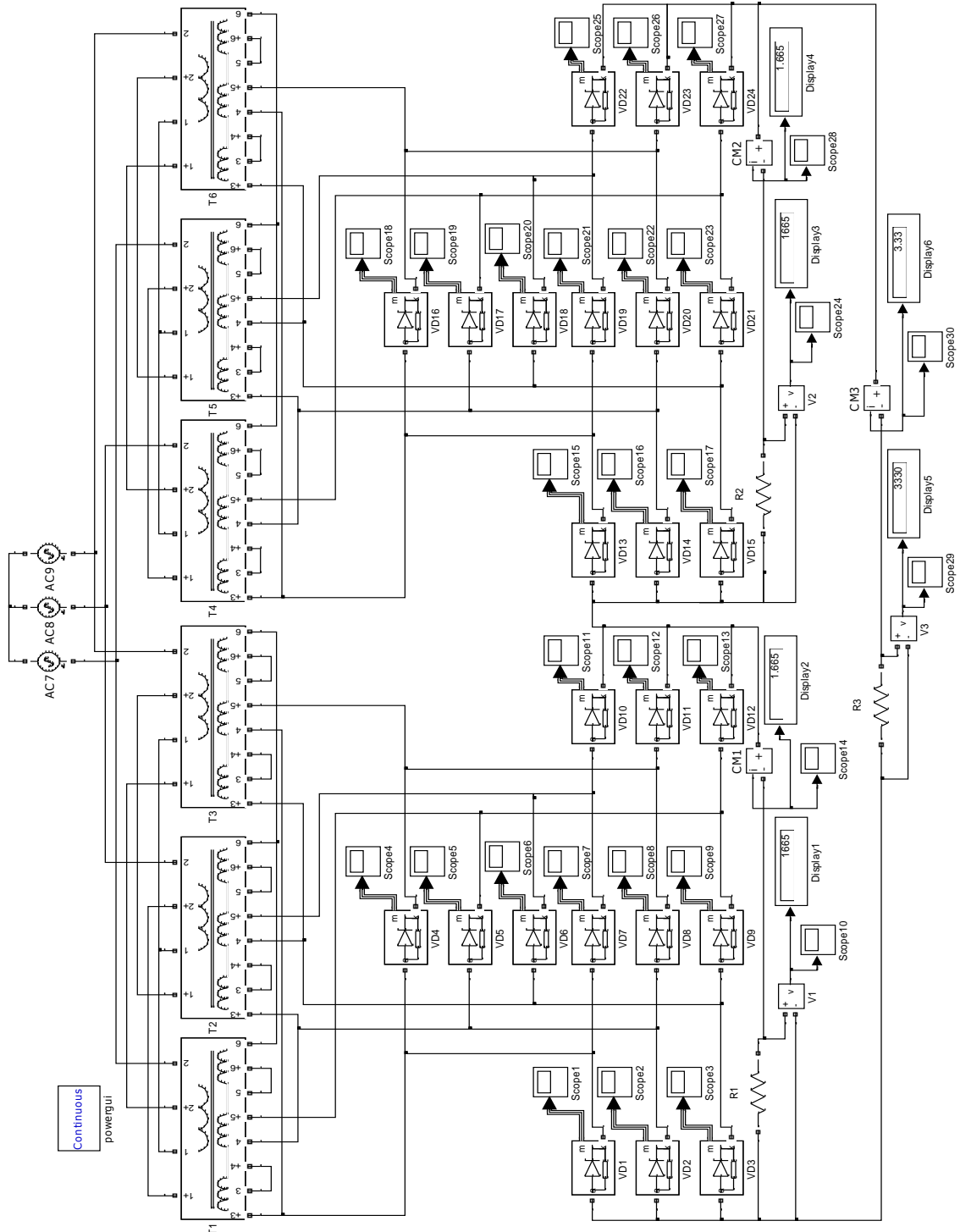


Рисунок 3.6 – Модель 24-х пульсового модульного ТВА последовательным соединением ТВМ

В сравнении с 12-ти пульсовым кольцевым ТВМ, количество вентиляй последовательно обтекаемых током нагрузки выпрямителя в 2 раза больше и, как

следствие, мощность потерь на вентилях на фоне всей вентиляльной схемы – увеличилось на 100%.

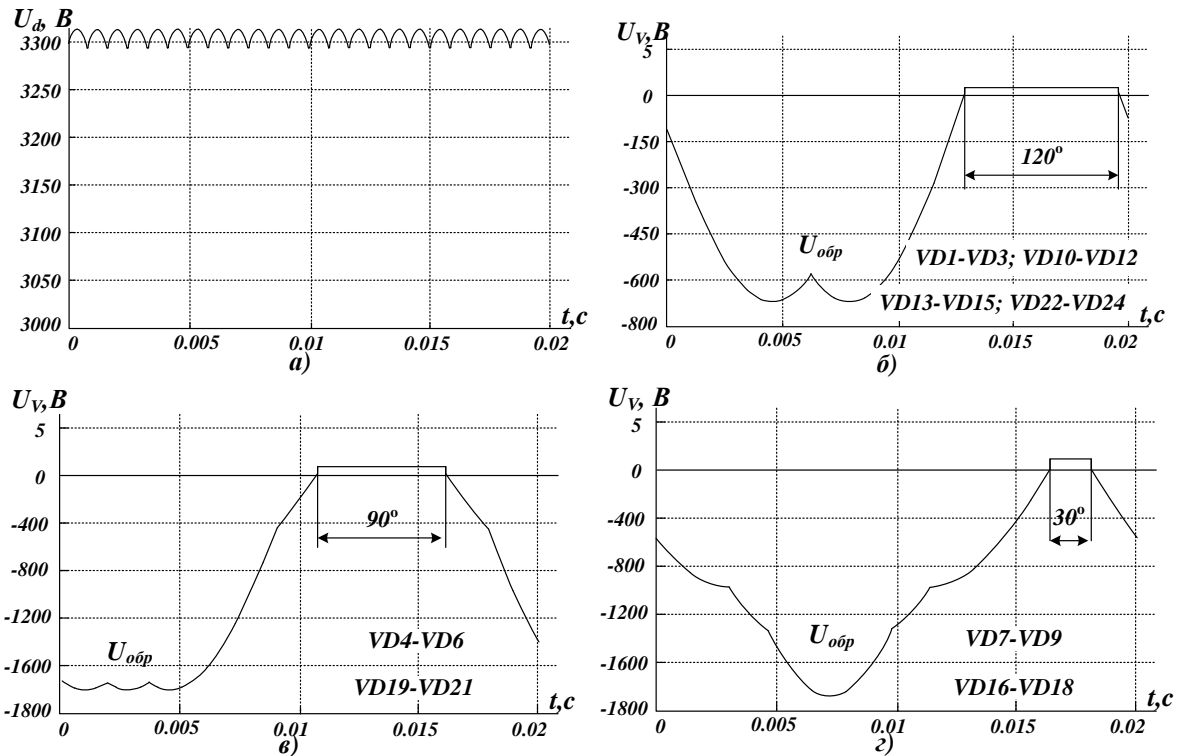


Рисунок 3.7 – Временные диаграммы напряжений компьютерной модели 24-х пульсового модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ: а) – выпрямленного  $U_d$ ; б) – вентилях анодно-катодной группы ( $120^\circ$ ); в) – вентилях кольцевой группы ( $90^\circ$ ); г) – вентилях кольцевой группы ( $30^\circ$ )

Форма выпрямленного тока по форме кривой и количеству пульсаций на (рисунке 3.8, а) соответствуют форме и количеству пульсаций выпрямленного напряжения на (рисунке 3.7, а). Кривая потребляемого преобразователем тока на (рисунке 3.8, б) содержит 24 ступеньки согласно, что приводит к лучшей электромагнитной совместимости потребителя с питающей трёхфазной сетью и снижению потерь, так как приводит к снижению гармонического состава по сравнению с формой потребляемого тока 12-ти пульсового ТВА [97-98], т.е. обладает лучшей ЭМС.

Амплитуды токов вентиляльных обмоток «звезда» и «треугольник», отображенных на (рисунке 3.8, г), равны действующему току  $I_d$  и представляют собой пульсации

прямоугольной формы, вершины которых содержат восемь пульсаций, а не четыре, как у 12-ти пульсовых ТВА.

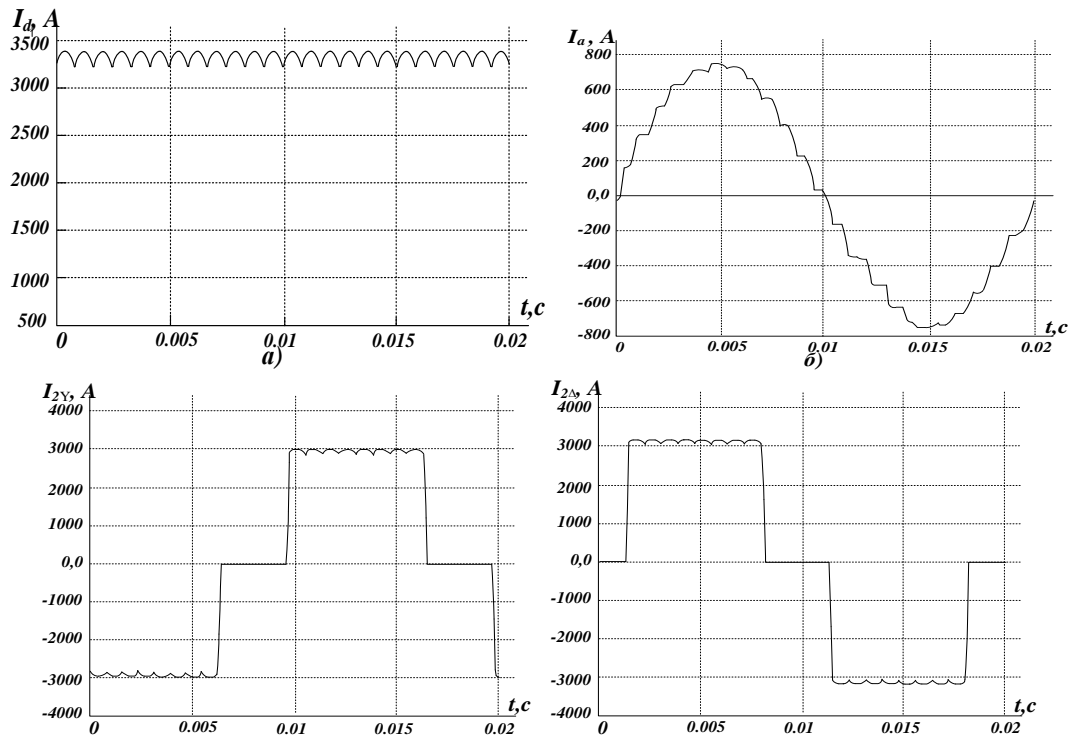


Рисунок 3.8 – Временные диаграммы токов компьютерной модели 24-х пульсового модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ: *a* – выпрямленного  $I_d$ ; *б* – трехфазной сети  $I_A$ ; *в* – ВО «звезда»; *д* – ВО «треугольник»

Результаты исследования гармонического состава потребляемого тока преобразователя отображены на рисунке 3.9, из чего следует, что общее гармоническое искажение сетевого тока по сравнению с 12-ти пульсовым кольцевым ТВА (рисунок 3.4) уменьшилось с 10.56% до 5.68%. Амплитуды гармоник незначительны и составляют 12-ой - 11.48% и 23-ой - 19.48% в сравнении с 12-ти пульсовым кольцевым ТВМ у которого значения гармоник составляют 11-ой - 53.03%, 13-ой - 39.97%, 23-ей - 11.19%, 25-ой - 12.02%. Гармонический состав выпрямленного тока ТВА представлен на рисунке 3.10.

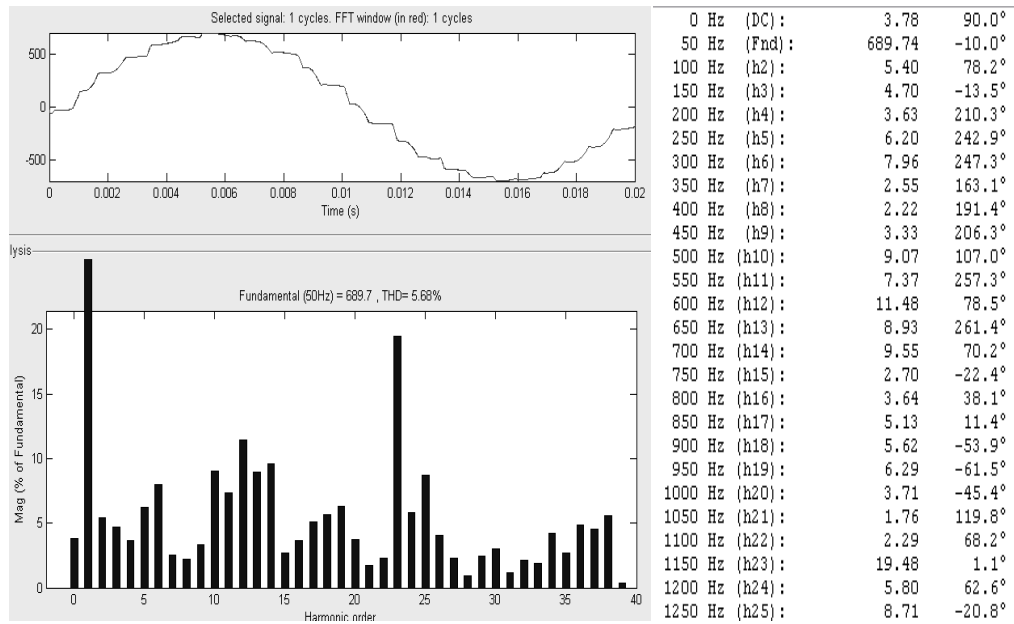


Рисунок 3.9 – Состав гармоник тока в трехфазной сети компьютерной модели 24-х пульсового модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ

где общее гармоническое искажение действующего тока значительно снизилось по сравнению с 12-ти пульсовым кольцевым ТВМ (рисунок 3.5) и составляет 18.28% против 22.12%.

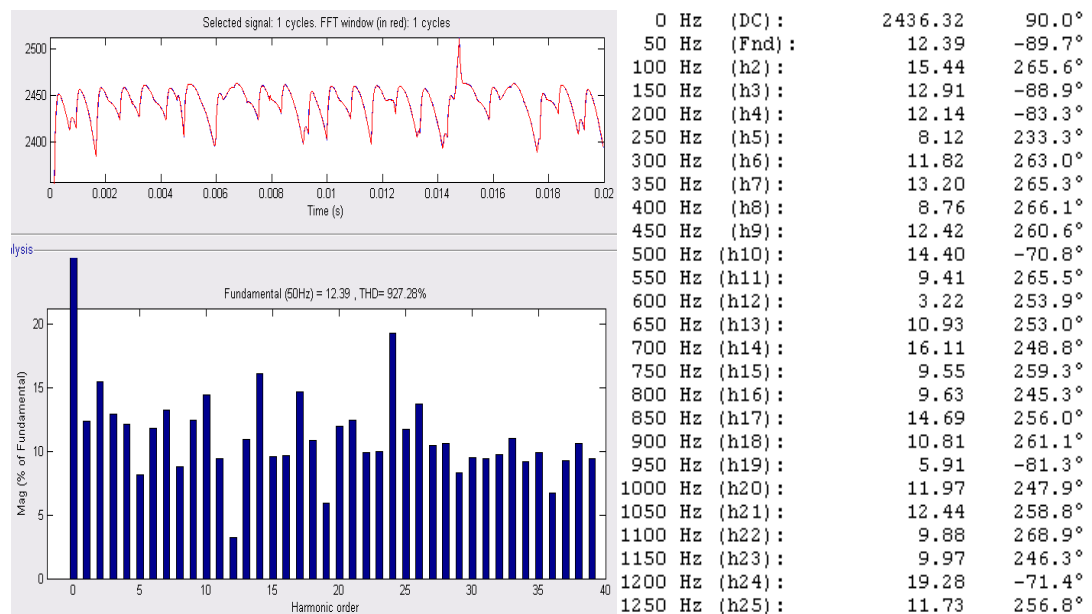


Рисунок 3.10 – Состав гармоник выпрямленного тока компьютерной модели 24-х пульсового модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ



Амплитуда постоянной составляющей больше, чем у 12-ти пульсового кольцевого выпрямителя на 8.6 единиц и составляет 2436.32 против 2427.72. Величина 24-ой гармоники невелика и составляет 19.29%.

### **3.1.3 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с параллельным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей**

Результаты исследований приведены на рисунках 3.12, 3.13, 3.14, 3.15. исследования которых показали, что форма выпрямленного напряжения имеет 24 пульсации, которые отображены на (рисунке 3.12, а) за период сетевого напряжения. Значения напряжений и токов  $U_{2Y}/U_{d0}$ ;  $U_{2\Delta}/U_{d0}$ ;  $I_{2Y}/I_d$ ;  $I_{2\Delta}/I$ ; характеризующие отношения фазных напряжений и токов ВО и средними значениями выпрямленного тока и напряжения, соответствуют значениям таблицы 2.4, которые определены теоретическими исследованиями во второй главе. Формы обратных напряжений вентилей анодно-катодных и кольцевых групп отображены на (рисунке 3.12, б, в, г). Они аналогичны формам обратных напряжений 24-х пульсового модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ, во первых их амплитуда в два раза больше и они равны амплитудам 12-ти пульсового кольцевого ТВМ. Обратные напряжения вентилей также имеют такие же формы кривых напряжений как у предыдущего решения на (рисунке 3.7, б, в, г) но при этом углы проводимости вентилей составили анодно-катодная группа –  $105^0$  эл. град. (рисунке 3.12, б), кольцевая группа : на (рисунке 3.12, в) –  $75^0$  эл. град., на (рисунке 3.12, г) –  $15^0$  эл. град., в отличии от предыдущего ТВА, где углы проводимости вентилей составляли  $120^0$ ,  $90^0$  и  $30^0$  эл. град. у данного ТВА все углы проводимости сократились на  $15^0$  эл. град. что подтверждено (рисунками 3.12, г). Углы проводимости вентилей, определенные на компьютерной модели подтвердили достоверность предложенной фазо-аналитической методики предопределившей такое поведение углов проводимости при параллельной работе трансформаторно-выпрямительных секций . В сравнении с предыдущим ТВА с последовательным соединением ТВМ, количество вентилей последовательно обтекаемых током нагрузки преобразователя уменьшилось в 2 раза.

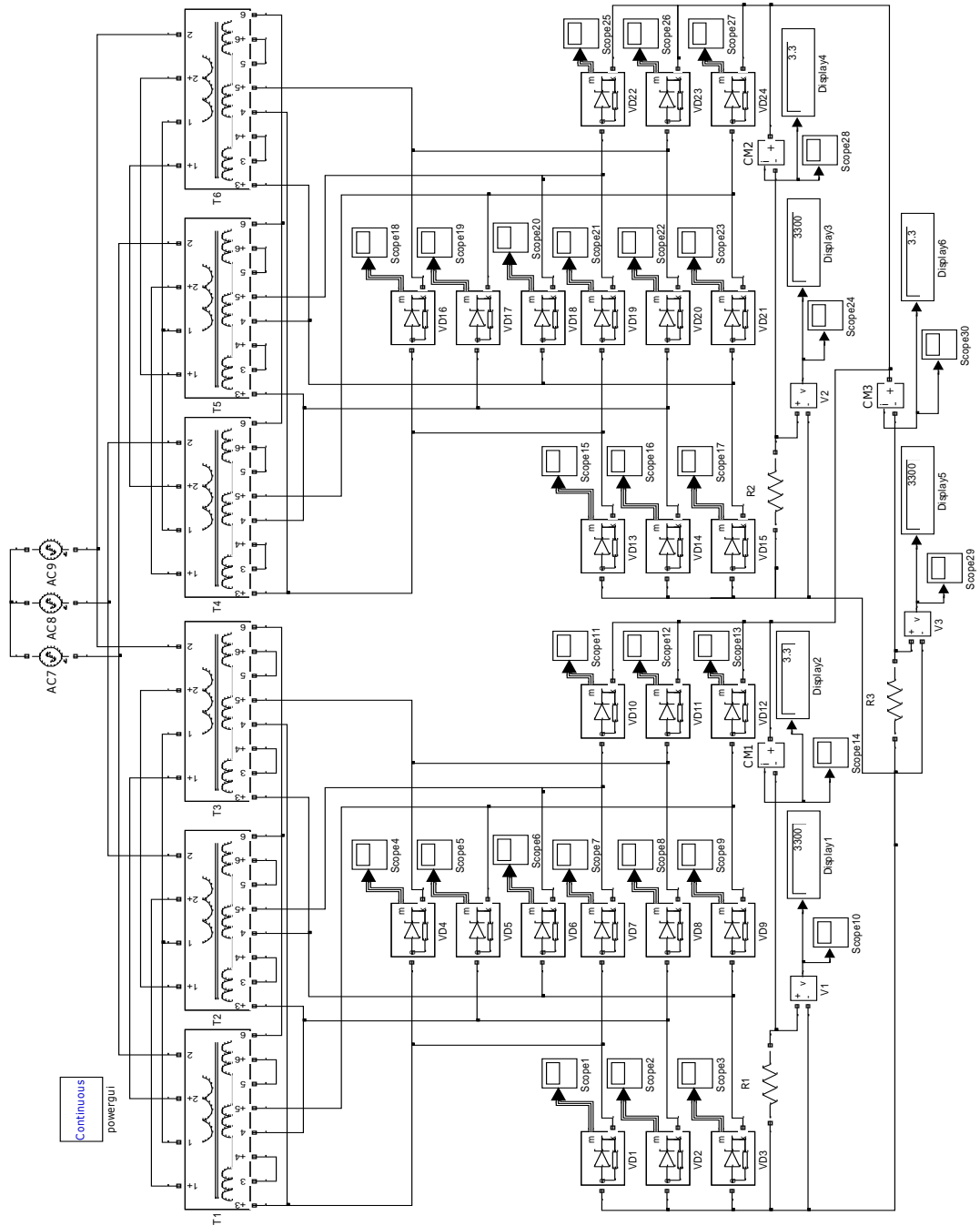


Рисунок 3.11 – Модель 24-х пульсового модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ

Как следствие мощность потерь на вентилях данного схемотехнического решения в сравнении с 12-ти пульсовым ТВА кольцевого типа одинакова, а в отношении с 24-х пульсовым мостовым ТВА последовательно-параллельного типа уменьшается на 25%.

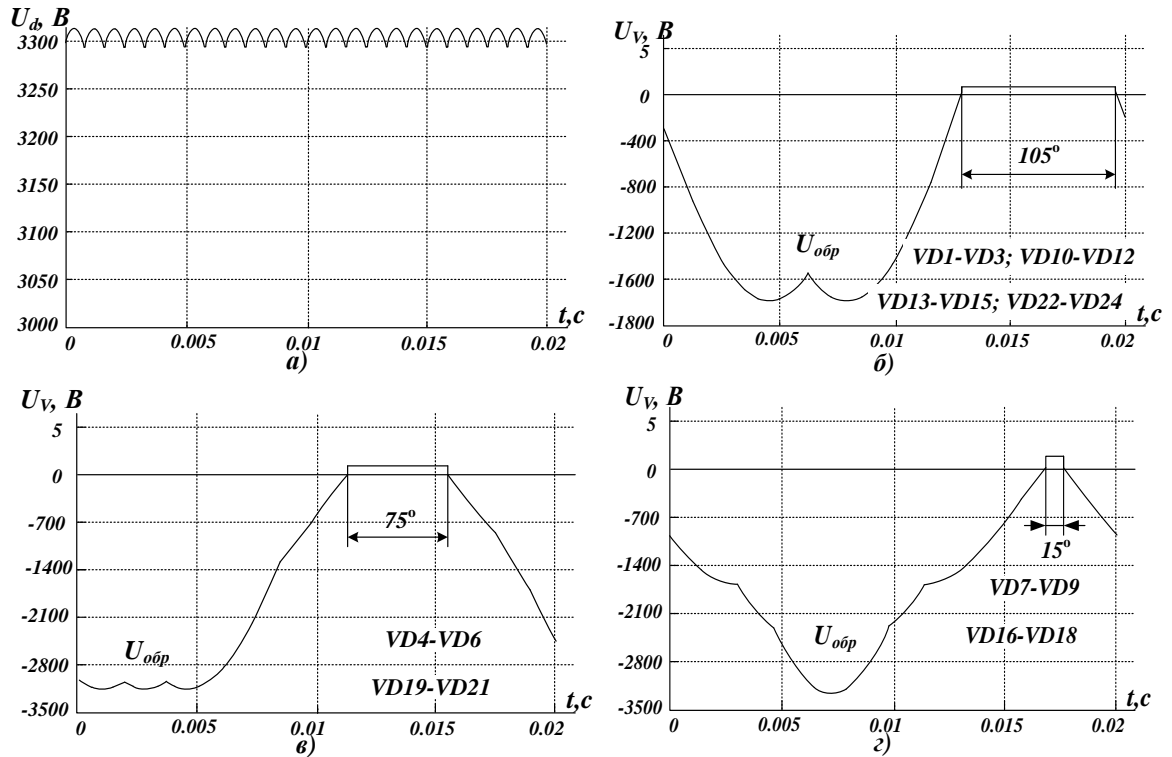


Рисунок 3.12 – Временные диаграммы напряжений модели 24-х пульсового модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ: *a* – выпрямленного  $U_d$ ; *б* – вентилей анодно-катодной группы ( $120^\circ$ ); *в* – вентилей кольцевой группы ( $90^\circ$ ); *г* – вентилей кольцевой группы ( $30^\circ$ )

Форма выпрямленного тока по форме кривой и количеству пульсаций, представленных на (рисунке 3.13, а), соответствуют форме и количеству пульсаций выпрямленного напряжения на (рисунке 3.12, а). Кривая потребляемого выпрямителем тока на (рисунке 3.13, б) содержит 24 ступеньки. Это ведет к улучшению электромагнитной совместимости потребителя с питающей трёхфазной сетью и снижению потерь, так как приводит к снижению гармонического состава по сравнению с формой потребляемого тока двенадцатипульсовых ТВА [97-98], а ее форма аналогична форме сетевого тока, потребляемого модульного ТВА последовательного типа. Амплитуды токов вентильных обмоток «звезда» и «треугольник» отображенных на (рисунке 3.13, г), равны половине действующего тока  $I_d$  и представляют собой пульсации прямоугольной формы, вершины которых имеют четыре пульсациями.

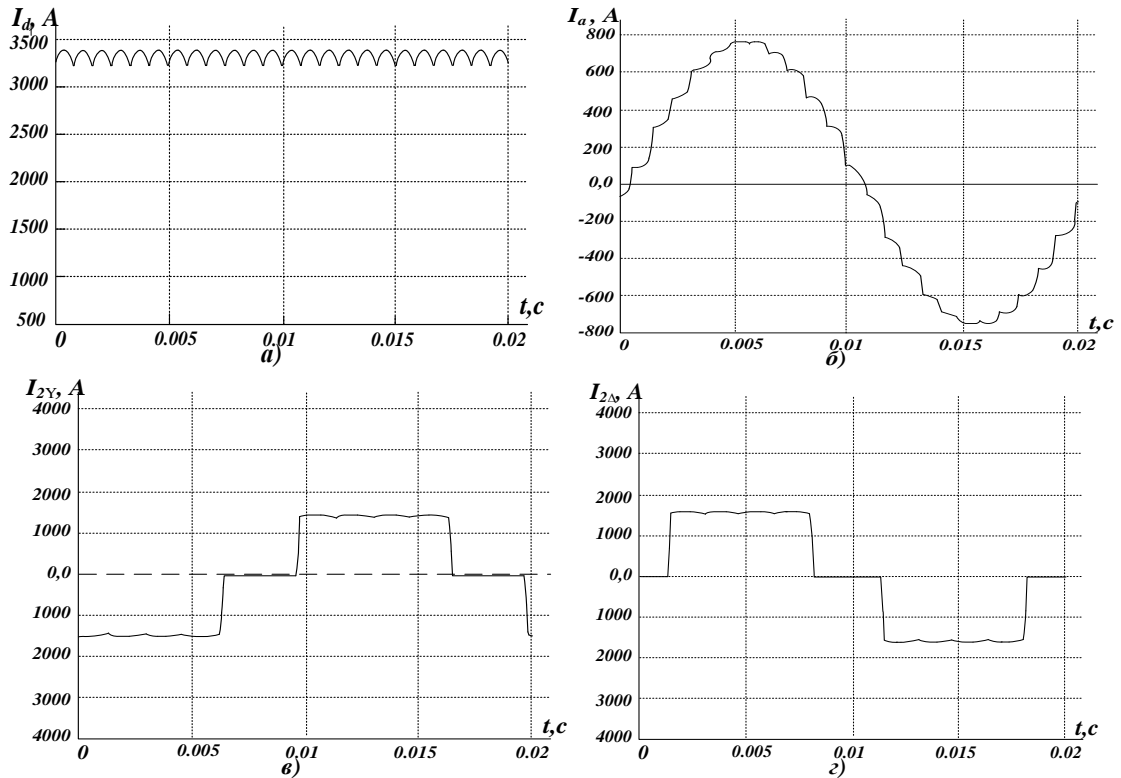


Рисунок 3.13 – Временные диаграммы токов модели 24-х пульсового модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ: *а* – выпрямленного  $I_d$ ; *б* – трехфазной сети  $I_A$ ; *в* – вентильных обмоток «звезда»; *д* – вентильных обмоток «треугольник»

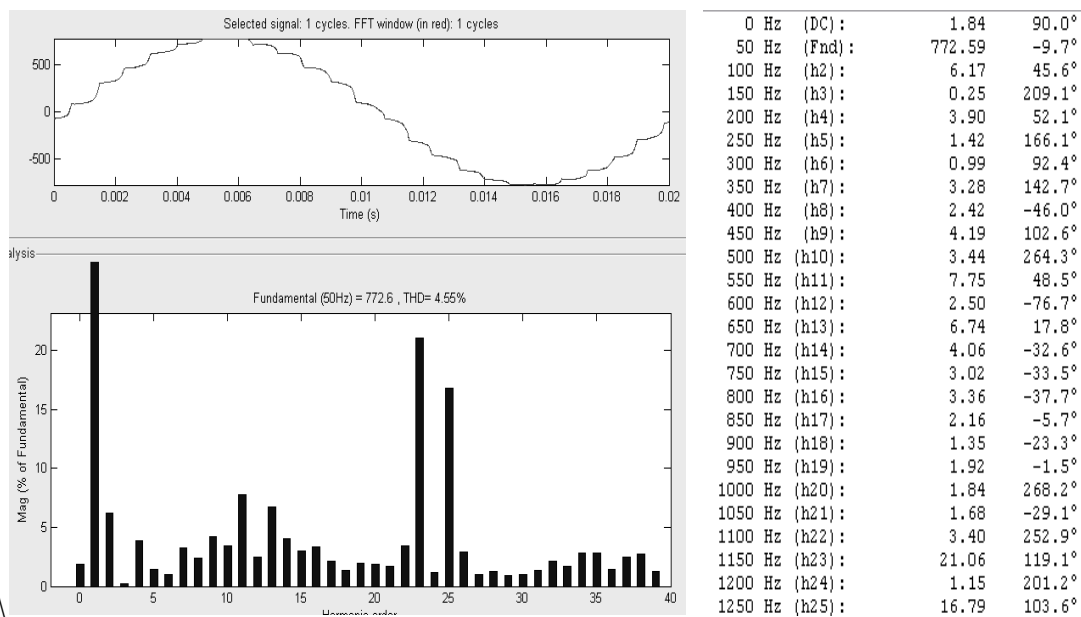


Рисунок 3.14 – Состав гармоник тока в трехфазной сети компьютерной модели 24-х пульсового модульного преобразовательного агрегата параллельного типа

Пульсации, в отличие от модульного ТВА последовательного типа, у которого восемь пульсаций. Результаты исследования гармонического состава потребляемого тока ТВА отображены на рисунке 3.14 из чего следует, что общее гармоническое искажение сетевого тока по сравнению с ТВА последовательного типа (рисунок 3.9) уменьшилось с 5.68% до 4.55%.

В сетевом токе имеются только гармоники 23-я и 25-я, а 12-я гармоника отсутствует, которая присутствует в токе у 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА последовательного типа (рисунок 3.9).

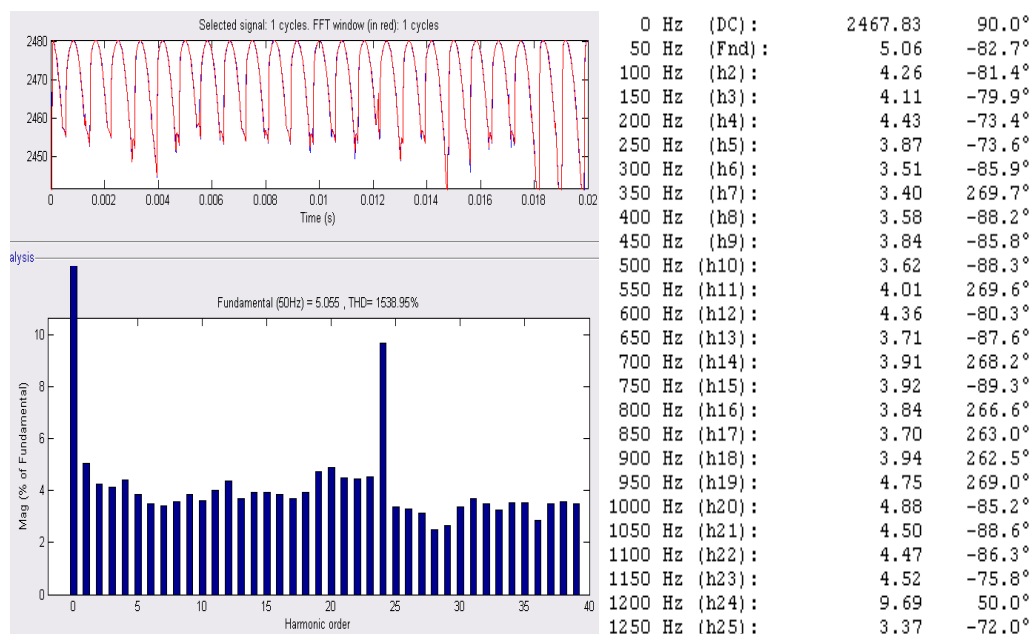


Рисунок 3.15 – Состав гармоник выпрямленного тока компьютерной модели 24-х пульсового модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ

В сетевом токе имеются только гармоники 23-я и 25-ой, а 12-я гармоника отсутствует, которая присутствует в токе у 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА последовательного (рисунок 3.9). Гармонический состав выпрямленного тока ТВА представлен на рисунке 3.15, где общее гармоническое искажение действующего тока несколько меньше чем у 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА последовательного типа (рисунок 3.10) и составляет 15.92% и 18.28% соответственно, при этом амплитуда постоянной составляющей больше на 31.51 единиц и составляет 2467.83 против 2436.32. Величина 24-ой гармоники меньше и составляет 09.69% против 19.29%.

### 3.1.4 Расчет энергетических характеристик модульных двадцатичетырех пульсовых трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математическим моделям

#### 3.1.4.1 Расчет коэффициентов мощности трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математической модели

Одна из энергетических характеристик выпрямительного устройства коэффициент мощности имеет наиболее значение. Так при увеличении пульсности выпрямителей происходит увеличение коэффициента мощности, при этом происходит значительное снижение потребления реактивной мощности. Как отмечается в [18, 25], у шестипульсового схемотехнического решения коэффициент мощности составляет 0,88...0,91, при этом доля потребления реактивной мощности выпрямителем составляет почти половину преобразуемой. Дальнейшее увеличение коэффициента мощности обеспечил переход выпрямителей к 12-ти пульсным схемам выпрямления, что увеличило значения до 0,97...0,98, при этом доля потребления реактивной мощности выпрямителем снизилась до 17...20% от преобразуемой активной. Проблема снижения реактивной мощности в преобразовательном процессе связанной с увеличением пульсности выпрямителей является актуальной так как при этом происходит снижение гармонических искажений сетевого тока и связанное с этим снижением уровня гармоник в потребляемом токе.

Энергетическая характеристика выпрямителя ( $\chi$ ) коэффициент мощности определяется по формуле:

$$\chi = \frac{P_{(1)}}{S} = \frac{E_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_{(1)}}{E \cdot I} = v_I \cdot \cos \varphi_{(1)}. \quad (3.1)$$

Степень искажения формы сетевого тока характеризуется коэффициентом искажения ( $v_I$ ) формы тока (используют выражение коэффициент формы), определяется по формуле:

$$K_{И} = v_{I\gamma} = \frac{v_I \cdot \left( 1 - k_3 \cdot u_k \cdot \sin \frac{\pi}{mq} \right)}{\cos \left( \frac{2 \cdot \gamma_{mq}}{3} \right) \cdot \sqrt{1 - \frac{\gamma_{mq} \cdot mq}{675} \cdot \sin^2 \frac{\pi}{mq}}}, \quad (3.2)$$

где  $\gamma_{mq}$  - угол коммутации вычисляемый по формуле:

$$\gamma_{mq} = \arccos \left( 1 - 2 u_k \cdot k_3 \cdot \sin \frac{\pi}{mq} \right). \quad (3.3)$$

При больших мощностях трансформатора без учета тока холостого хода коэффициент сдвига тока, определяется в общем виде с учетом коммутации вентильных токов и вычисляется по формуле:

$$\cos \varphi_{(l)} = 1 - k_3 \cdot u_k \cdot \sin \frac{\pi}{mq}. \quad (3.4)$$

Пренебрегать током холостого хода при расчетах коэффициента мощности в том числе при очень малых нагрузках нельзя. Так как при токах холостого хода коэффициент сдвига  $K_C$  и угол сдвига  $\varphi_{(l)}$  возрастают и в соответствии с [18, 25] определяем по формуле:

$$K_C = \frac{k_3 \cos \varphi_{(l)} + k_{XX} \cos \varphi_0}{\sqrt{k_3^2 + k_{XX}^2 + 2k_3 k_{XX} \cos \varphi_{(l)} \cos \varphi_0 + 2k_3 k_{XX} \sin \varphi_{(l)} \sin \varphi_0}}, \quad (3.5)$$

где  $k_{XX}$  - коэффициент холостого хода, это отношение  $I_0 / I_{1(1)НОМ}$  трансформатора;

$\varphi_0$  - составляет значение угла сдвига между током холостого хода и первой гармоникой напряжения.

Тогда с учетом тока холостого хода получаем:

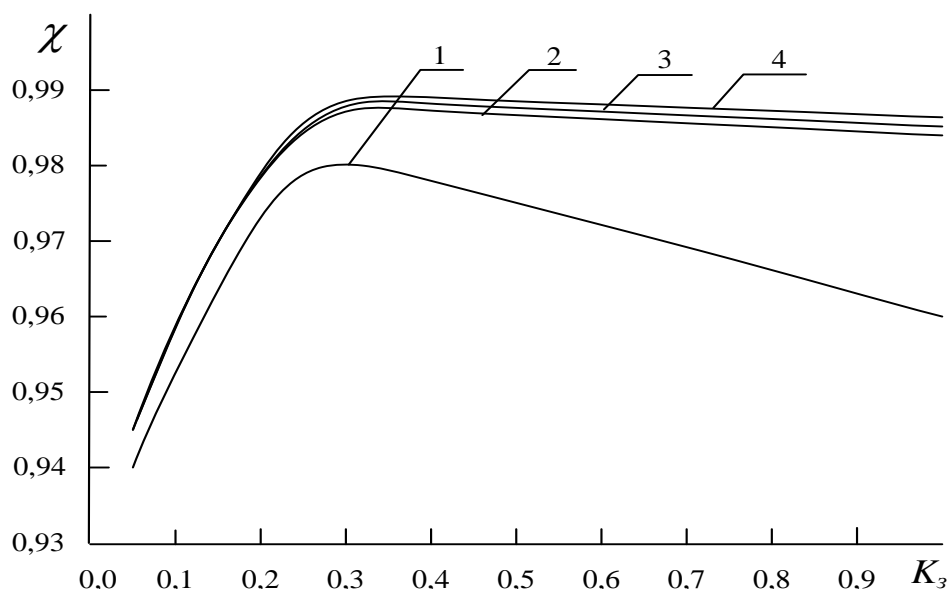
$$\chi_{mq} = v_{I\gamma} \cdot K_C = K_H \cdot K_C. \quad (3.6)$$

По формулам (3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6) сделаны расчеты, необходимые при сопоставлении мощных выпрямителей. Результаты расчетов занесены в таблице 3.1. Результаты расчетов представлены на рисунке 3.16 в виде графической зависимости коэффициентов мощности 12-ти и 24-пульсовых выпрямителей от коэффициента загрузки.

Таблица 3.1 – Зависимости основных коэффициентов ( $K_{II}$ ,  $K_C$ ,  $\chi_{mq}$ ) от нагрузки ( $K_3$ )

$K_3$		0	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,0
$K_C$	12	0,1736	0,9852	0,9853	0,9840	0,9801	0,9756	0,9709
	24м	0,1736	0,9881	0,9888	0,9883	0,9859	0,9830	0,9799
	24к	0,1736	0,9897	0,9907	0,9905	0,9889	0,9868	0,9846
$K_{II}$	12	0,9886	0,9929	0,9938	0,9944	0,9954	0,9962	0,9969
	24м	0,9949	0,9973	0,9977	0,9980	0,9985	0,9989	0,9991
	24к	0,9971	0,9986	0,9989	0,9991	0,99936	0,9995	0,9997
$\chi_{mq}$	12	0,1716	0,9782	0,9791	0,9785	0,9756	0,9719	0,9679
	24м	0,1727	0,9854	0,9865	0,9862	0,9844	0,9819	0,9791
	24к	0,1731	0,9883	0,9896	0,9896	0,9883	0,9864	0,9843

Из-за незначительного расхождения значений коэффициентов  $K_C$ ,  $K_{II}$ ,  $\chi_{mq}$  для сравниваемых 24-х пульсовых схем выпрямления минимальны, поэтому для иллюстративности коэффициента мощности эти графики (рисунок 3.16) немного сдвинуты вниз относительно друг друга.

Рисунок 3.16 – Графики зависимости коэффициента мощности от пульсности и  $K_3$ 

где: №1 – 12-ти пульсовый ТВМ кольцевого типа;



- №2 – 24-х пульсовый ТВА мостовой последовательно-параллельного типа с УР;
- №3 – 24-х пульсовый кольцевой модульный ТВА с последовательным соединением ТВМ;
- №4 – 24-х пульсовый кольцевой модульный ТВА с параллельным соединением ТВМ.

Анализ графиков на (рисунке 3.16) показывает, что наибольшее значение коэффициента мощности выпрямителей достигается при нагрузке  $k_3 = 0,25 - 0,35$ , а при увеличении пульсности выпрямителей значения коэффициента мощности при увеличении значений  $k_3$  незначительно снижается.

### **3.1.4.2 Расчет коэффициентов полезного действия трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математическим моделям**

Математические модели определяющие значения энергетических показателей в многопульсных ТВА, построенных по предложенным схмотехническим решениям, приведены в данной главе выше. Там же определены коэффициенты мощности, построены внешние характеристики.

КПД это важнейший показатель, применяется математическая модель по определению тяговой подстанций с мостовым 24-х пульсовым и 12-ти , 24-х пульсовыми кольцевыми ТВА. Проведены расчеты коэффициента полезного действия, многопульсных ТВА, в основе которых использована исходная информация о технических характеристиках тяговых подстанций железнодорожного электрического транспорта. При сопоставительном анализе КПД выпрямителей учитывалось, что они с одинаковым числом пульсаций выпрямленного напряжения, и располагают одинаковым трансформаторным оборудованием, при этом мощность ( $P_d$ ) ТВА реализуется практически при идентичных выпрямленных токах. Поэтому расчеты КПД тяговых подстанций оснащенных данными ТВА, выполнены именно значений тока ( $I_d$ ) на стороне выпрямленного напряжения( $U_d$ ). Тяговая подстанция содержит два трансформатора один понизительный, который производит согласование параметров питающей сети с входными параметрами ТВА, второй

трансформатор тяговый выполняющий функцию ТПЧФ выпрямительного агрегата [96].

С учетом влияния понизительного трансформатора на выпрямитель, определяем расчетные соотношения используя [99-101] где учитываем условия определяющей КПД:

$$\eta = \frac{P_{ВЫХ}}{P_{ВХ}}. \quad (3.7)$$

КПД тяговой подстанции рассчитываем, пренебрегаем потерями мощности в устройствах собственных нужд [99], по следующей формуле:

$$\eta = P_d [P_d + \Delta P_{XX} + \Delta P_{K3} + \Delta P_{\phi} + \Delta P_B]^{-1} \quad (3.8)$$

где  $\Delta P_{XX}$  – суммарные потери холостого хода тягового и понизительного трансформаторов;

$\Delta P_{K3}$  – потери короткого замыкания, с учетом двух трансформаторов;

$\Delta P_{\phi}$  – потери мощности в реакторах сглаживающего фильтра;

$\Delta P_B$  – потери в вентилях выпрямителя.

В соответствии с [99]:

$$\Delta P_{K3} = D^2 \cdot k_H^2 \left( \Delta P_{K3 T} + \frac{S_{НОМ T}^2}{S_{НОМ П}^2} \cdot \Delta P_{K3 П} \right), \quad (3.9)$$

Где:  $D = 2,4465$  – коэффициент схемы 12-ти пульсового выпрямителя, используется при упрощения расчетов;

$\Delta P_{K3 T}$  ( $\Delta P_{K3 П}$ ) – потери короткого замыкания для трансформаторов тягового (понижительного);

$S_{НОМ T}$  ( $S_{НОМ П}$ ) – номинальная мощность тягового (понижительного) трансформаторов;

коэффициент  $k_H$  определяется из формулы:

$$k_H = \frac{b \cdot K_3}{\sqrt{6 \cdot b - u_K \cdot K_3}}, \quad (3.10)$$

где  $b = 1,57$  при 12-ти пульсовой схеме последовательного типа;

$u_K$  определяется из соотношения:

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{u}_{kT} + \mathbf{u}_{kП} \cdot \frac{S_{НОМ Т}}{S_{НОМ П}}, \quad (3.11)$$

где  $\mathbf{u}_{kT}$  ( $\mathbf{u}_{kП}$ ) – напряжения короткого замыкания для трансформаторов тягового (понижительного).

Потери мощности на сглаживающем фильтре (реакторе) выражением:

$$\Delta P_\phi = R \cdot K_3^2 \cdot \left[ \frac{P_{dНОМ}}{U_{d0} \left( 1 - \frac{u_k \cdot k_3}{\sqrt{6} \cdot b} \right)} \right]^2, \quad (3.12)$$

где общее сопротивление блоков реактора  $R = 0,006$  Ом при 12-ти пульсовой схеме выпрямления, а  $P_{d0} = U_{d0} \cdot I_{dНОМ}$ .

Так как сравниваемые выпрямители обладают одинаковой пульсностью, также типовые мощности трансформаторного оборудования не различаются, а мощность нагрузки реализуется практически при одинаковых токах. Что позволяет, проводить сравнения только по мощности потерь в СПП указанных вентильных конструкций.

Потери мощности на вентилях одной 12-ти пульсовой выпрямительной секции мостового выпрямителя определены с учетом коэффициента загрузки  $k_3$  по формуле:

$$\Delta P_B = \frac{p}{3} \cdot s \cdot U_{TO} \cdot I_d + \frac{p \cdot s}{3 \cdot a} \cdot I_d^2 \cdot r_T, \quad (3.13)$$

а кольцевого выпрямителя по формуле:

$$\Delta P_B = \left( \frac{p}{6} + 1 \right) \cdot s \cdot U_{TO} \cdot I_d + \left( \frac{p}{6} + 1 \right) \cdot \frac{s}{a} \cdot I_d^2 \cdot r_T \quad (3.14)$$

Создана математическая модель по формулам (3.7 - 3.14) определяющая КПД новых 24-х пульсовой мостовой схеме последовательно-параллельного типа (рисунок 1.12), по кольцевой 24-х пульсовой с последовательным соединением модулей (рисунок 2.6) и кольцевой 24-х пульсовой с последовательным соединением модулей (рисунок 2.14) схемам. Результаты расчетов представлены в виде зависимостей КПД ТВА от коэффициента загрузки на (рисунке 3.17),

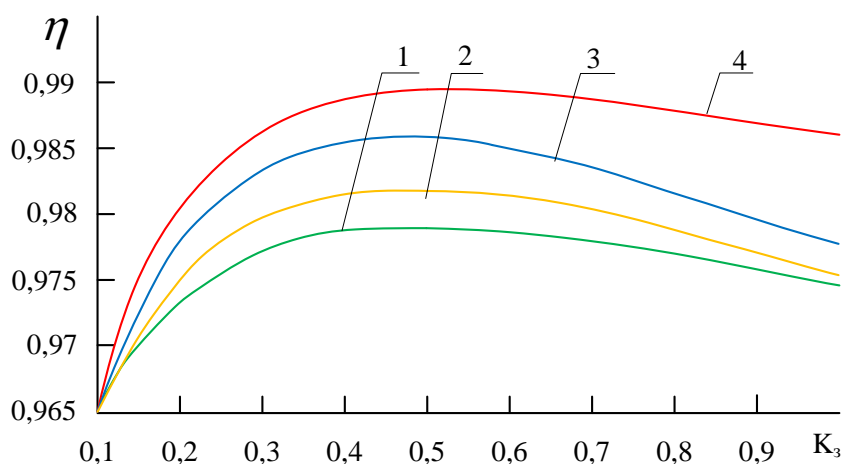


Рисунок 3.17 – Расчетные зависимости КПД ТВА от коэффициента загрузки

где: №1 – 12-ти импульсный ТВМ кольцевого типа;

№2 – 24-х импульсный ТВА мостовой последовательно-параллельного типа с УР;

№3 – 24-х импульсный кольцевой модульный ТВА с последовательным соединением ТВМ;

№4 – 24-х импульсный кольцевой модульный ТВА с параллельным соединением ТВМ.

Полученные зависимости КПД от коэффициента загрузки (рисунок 3.17) указывают о превышении КПД выпрямителей новых схемотехнических решений в сравнении с 24-х импульсным ТВА с последовательно-параллельным соединением трехфазных мостов. При определенных параметрах ТВА, КПД тяговой подстанции повышается в среднем на 0,25 – 0,37 % если мостовые выпрямители заменить кольцевыми. Экспериментальные данные характеризуют сокращение суммарных потерь мощности в ТВА нового типа. Повышение КПД связано помимо повышения коэффициента мощности снижением потерь мощности в вентильных схемах, немаловажным является то, что исключаются потери на уравнительном реакторе. Проведенные эксперименты показали, что увеличение числа параллельно соединенных в плече вентилей и использование вентилей с лучшими характеристиками не вызвало заметное увеличение КПД.

Для получения более полной характеристики о формировании КПД ТВА необходимо учитывать влияние коэффициента мощности с изменением коэффициента загрузки выпрямителей. Такой характеристикой является энергетический КПД который определяется выражением:  $\eta_{\text{Э}} = \eta \cdot \chi$

где:  $\chi$  – коэффициент мощности;

$\eta$  – коэффициент полезного действия;

$\eta_{\text{Э}}$  – энергетический коэффициент полезного действия.

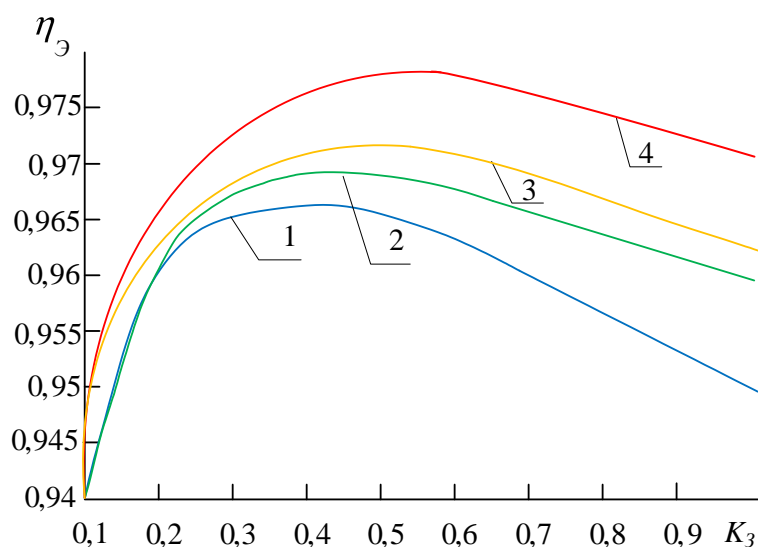


Рисунок 3.18 – Расчетные зависимости энергетического КПД ТВА от коэффициента загрузки

### 3.1.4.3 Расчет внешних характеристик трансформаторно-выпрямительных агрегатов по математическим моделям

Значение угла коммутации для любой  $mq$ -пульсовой схемы выпрямления согласно [19]:

$$\gamma_{mq} = \arccos \left( 1 - 2 u_k \cdot k_3 \cdot \sin \frac{\pi}{mq} \right), \quad (3.15)$$

где  $u_k$  - напряжение короткого замыкания полученное расчетным путем и приведенное к параметрам вентильной обмотки;

$k_3$  - коэффициент загрузки, обозначающий отношение действующего тока  $I_d$  к номинальному току нагрузки  $I_{dНОМ}$ .

Уравнение внешней характеристики многопульсных ТВА как функция  $U_d$  от  $k_3$  коэффициента загрузки [2, 18]:

$$U_d = U_{d0} \left( 1 - u_k \cdot k_3 \cdot \sin \frac{\pi}{mq} \right), \quad (3.16)$$

где  $k_3 = I_d / I_{dНОМ}$  – коэффициент загрузки.

При большом значении индуктивного сопротивления наклон внешней характеристики характеризуется потерями напряжения на индуктивном сопротивлении трансформатора. Эти потери связаны с процессами коммутации вентильных токов и напрямую зависят от угла коммутации. Угол коммутации характеризуется индуктивным сопротивлением коммутации  $X_{\gamma H} = \frac{u_k}{I_{dНОМ}}$  известным, например, из [18].

Расчет внешних характеристик проведен в соответствии с выражениями (3.14 – 3.16) исследуемых моделей многопульсовых ТВА при определенном значении  $u_k = 0,1$ , диаграммы которых на рисунке 3.19.

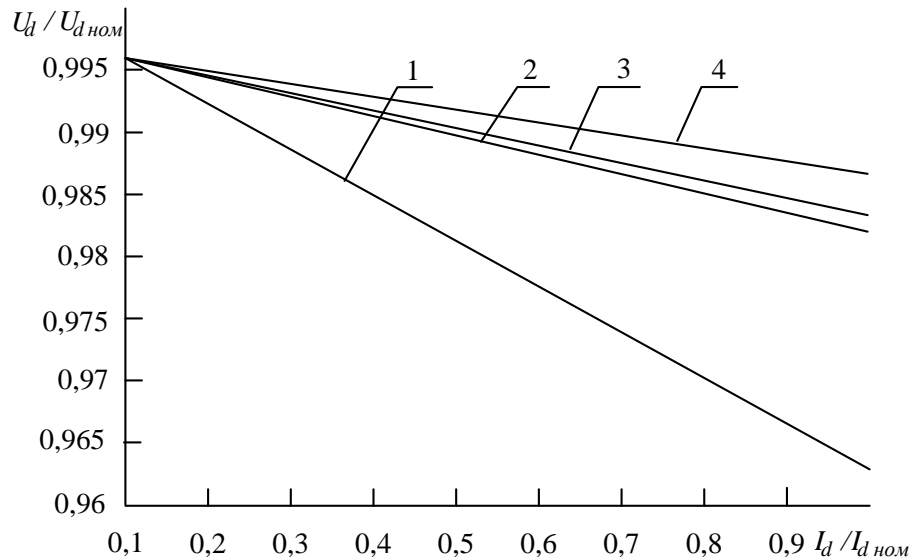


Рисунок 3.19 – Расчетные зависимости нормированного значения  $U_d/U_{d0}$  от загрузки выпрямителя

где: №1 – 12-ти импульсный ТВМ кольцевого типа;

№2 – 24-х пульсовый ТВА мостовой последовательно-параллельного типа с УР;

№3 – 24-х пульсовый кольцевой модульный ТВА с последовательным соединением ТВМ;

№4 – 24-х пульсовый кольцевой модульный ТВА с параллельным соединением ТВМ.

Таким образом с помощью имитационных моделей были исследованы процессы происходящие в 12-ти и 24-х пульсовых модульных ТВА с кольцевыми вентильными схемами и получены следующие результаты:

1. Подтверждена справедливость фазо-аналитической методики предопределившей различие углов проводимости у вентилей кольцевых групп и анодно-катодных групп у 24-х пульсового ТВА при последовательно и параллельном соединении ТВМ;
2. Показано, что снижение мощности потерь в вентилях кольцевых схемных решений связано не только сокращением числа вентилей в цепи тока нагрузки но и с уменьшением средней продолжительности времени работы (угла проводимости) вентилей кольцевой группы, что обуславливает уменьшение на 37 % по сравнению с мостовыми вентильными схемами.
3. Определены КПД мостовых и кольцевых 24-х пульсовых ТВА, доказывающих, что КПД кольцевых выпрямителей выше на 0,4 – 1, 1 % по сравнению с КПД известного мостового находящегося в эксплуатации.
4. Сравнительные результаты экспериментальных исследований на имитационных моделях 24-х пульсовых кольцевых ТВА, которое подтвердили идентичность коэффициентов мощности и различия КПД в основных режимах работы.
5. Определен гармонический состав сетевого тока и степень искажения выпрямленного напряжения в номинальных режимах нагрузки, подтверждающих более высокое качество преобразования электрической энергии 24-х пульсовыми выпрямителями модульного типа.

Проведенные эксперименты подтвердили совпадение теоретических и расчетных соотношений с результатами имитационного моделирования на компьютерных моделях.

### 3.2 Экспериментальные исследования на физической модели

Для проверки основных результатов диссертационных исследований полученных теоретическим путем и математическим моделированием в среде Matlab/Simulink с помощью физического моделирования на базе лабораторного комплекса кафедры ЭТК «НГТУ» были разработаны, изготовлены и испытаны 12-ти и 24-х пульсовые кольцевые ТВА модульного типа (рисунок 3.20).



Рисунок 3.20 – Элементы физической модели 24-х пульсового модульного ТВА с кольцевыми вентильными схемами

Для построения физической модели, [80, 102] изображенной на рисунке 3.20, будем использовать требования [103-106] использован трехфазный трансформатор с Ш - образным магнитопроводом ТСЗИ – 1.6; 220, 380/36,  $f = 50$ Гц. Основные характеристики трансформатора:  $I_{XX} = 20\%$ ;  $U_{K3} = 3,5\%$ ;  $KПД = 94,5\%$ ;  $P_{КГ} = 27,5$ .

Для формирования двух одинаковых ТПЧФ, магнитопровод трансформатора расщеплен на две равные части таким образом, что образовано два трансформатора мощностью  $S_{НОМ} = (S_1) = 800$  ВА для сетевого напряжения  $U_1 = 220$  В.



Вторичные обмотки трансформаторов выполнены по классическим схемным соединениям типа «звезда» и «треугольник», придающий фазовый сдвиг между трехфазными напряжениями создаваемые вторичными обмотками на  $30^{\circ}$  эл. градусов, напряжения отражены векторами этих обмоток (рисунок 3.21, а).

Сетевые обмотки этих трансформаторов разработаны по схемам «неравноплечий зигзаг», [80] которые обеспечивают фазовый сдвиг относительно сетевого напряжения, первого трансформатора  $+7,5^{\circ}$  эл. градусов, а второго  $-7,5^{\circ}$  эл. градусов, вектора напряжений этих обмоток на рисунке 3.21, б.

Такое построение первичных и вторичных обмоток позволяет сформировать между системами трехфазных напряжений обоих трансформаторов фазовые сдвиги в  $15^{\circ}$  эл. градусов для получения 24-х импульсного выпрямленного напряжения.

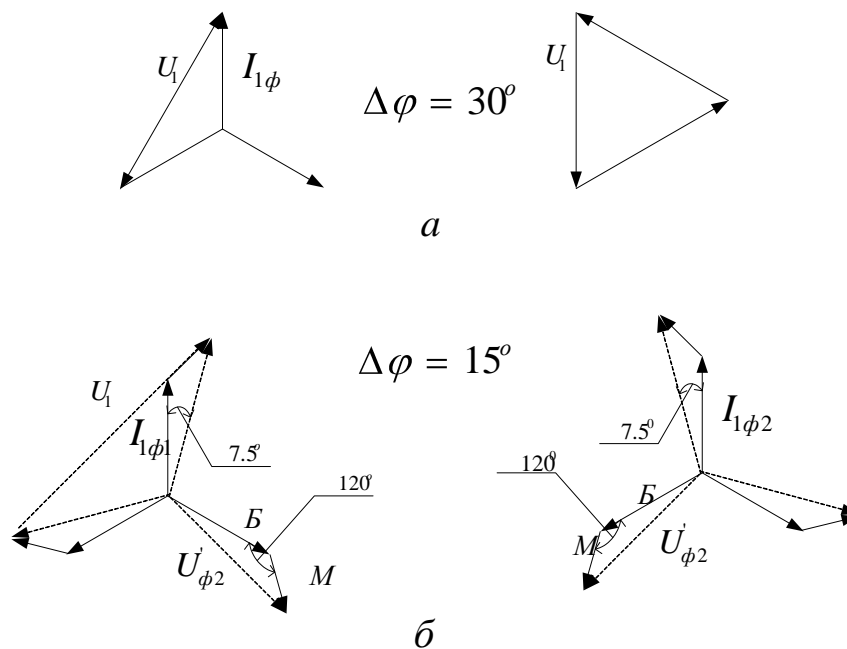


Рисунок 3.21 – Диаграммы напряжений вторичных и первичных обмоток трансформаторов физической модели

Также позволяет сформировать идентичные трансформаторы, необходимые для их параллельной и последовательной работы. Для получения фазового сдвига между трансформаторами необходимо подключение к сети первый трансформатор так, что два вывода первичных обмоток присоединены с транспозицией к трехфазной сети по сравнению с подключением идентичных выводов первичной обмотки второго

трансформатора (по напряжениям фазных обмоток и токам в них). Для получения фазового сдвига между трансформаторами необходимо подключить к сети первый трансформатор так, что два вывода первичных обмоток будут присоединены с транспозицией к трехфазной сети по сравнению с подключением идентичных выводов первичной обмотки второго трансформатора (по напряжениям фазных обмоток и токам в них). Первичные обмотки выполнены проводом диаметром 0,8 мм с числом витков для фазовой части 195 и фазосдвигающей 32, одна из вторичных обмотки для соединения «звездой» выполнены проводом диаметром 2,1 мм с числом витков 38, причем с выводом от середины, который делит ее на две равные части по 19 витков, а вторичная обмотка, для соединения «треугольником», выполнена проводом диаметром 2.4 мм с числом витком 66, при чем с выводом по середине, который делит ее на две равные части по 33 витка (рисунок 3.22).

Функциональные узлы 24-х пульсового модульного ТВА

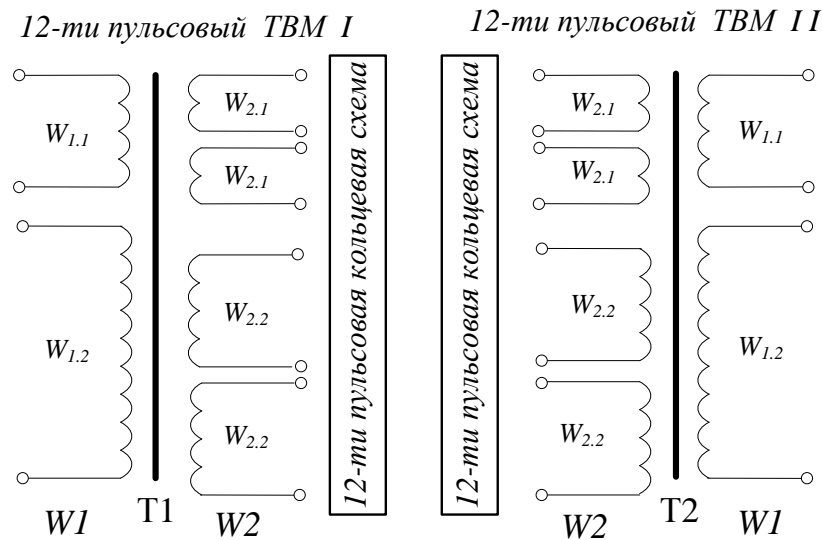


Рисунок 3.22 – Основные функциональные узлы и соотношения чисел витков обмоток трансформаторов физической модели

Деление вторичных обмоток трансформаторов необходимо для последовательной и параллельной работы преобразовательных модулей.

Число витков трансформаторов составляет:

-первичной обмотки  $W_{1.1} = 32$  витка;  $W_{1.2} = 195$  витков;

-вторичной обмотки  $W_{2,1} = 19$  витков;  $W_{2,2} = 33$  витка.

Первичная обмотка запитывается напряжением 220 В, а на выходе вторичной обмотки формируется 73 В.

Программа проведения испытаний:

- Измерение действующих значений напряжения и тока;
- Измерение токов и напряжений на элементах нагрузочного реостата и коллекторного электродвигателя;
- Снятие осциллограмм.

С помощью коммутационных переключателей проводили подбор схемных решений [112] проводились переключения вентильных цепей, вентиля и выпрямительных модулей для создания следующих вариантов конструкций:

- 12-ти пульсового кольцевого модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ без фазового сдвига;
- 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА с последовательным соединением ТВМ с фазовым сдвигом в  $15^0$  эл. градусов;
- 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ с фазовым сдвигом в  $15^0$  эл. градусов.

Замеры при экспериментальных исследованиях проводились с использованием следующего оборудования и измерительных приборов: цифровой осциллограф Rigol DS1042C, цифровые мультиметры DT838, токовые клещи APPA-39MR, нагрузочный реостат, коллекторный двигатель М309 (STM309) мощностью  $P_{ном} = 1600$  Вт.

Эксперименты проводились на лабораторной базе кафедры ЭТК «НГТУ». Где трехфазное напряжение сети питания являлось практически симметричным как в [111]. Так как лаборатория располагается в близости от линий тягового электроснабжения метрополитена и городского электротранспорта несинусоидальность составляло около 2 %, Шестипульсные ТВА, которыми оборудованы тяговые подстанции ГЭТ и метрополитена, обуславливают появление в сетевых напряжениях пятой и седьмой неканонических гармоник. В связи с этим сопоставительные характеристики 12-ти и 24-х пульсовых ТВА получены в условиях приближенных к реальным условий эксплуатации.

Измерительные приборы поверенные и один класс точности которых обеспечивают в показаниях измерительных приборов минимальные расхождения, что позволяет отображать кривые графиков более равномерно с наименьшими отклонениями.

### 3.2.1 Результаты исследований двенадцати пульсового трансформаторно-выпрямительного модуля

Результаты проведенных исследований приведены на (рисунках 3.23 и 3.24). Исследования показали, что форма выпрямленного напряжения имеет 24 пульсации за период сетевого напряжения (рисунок 3.23, а).

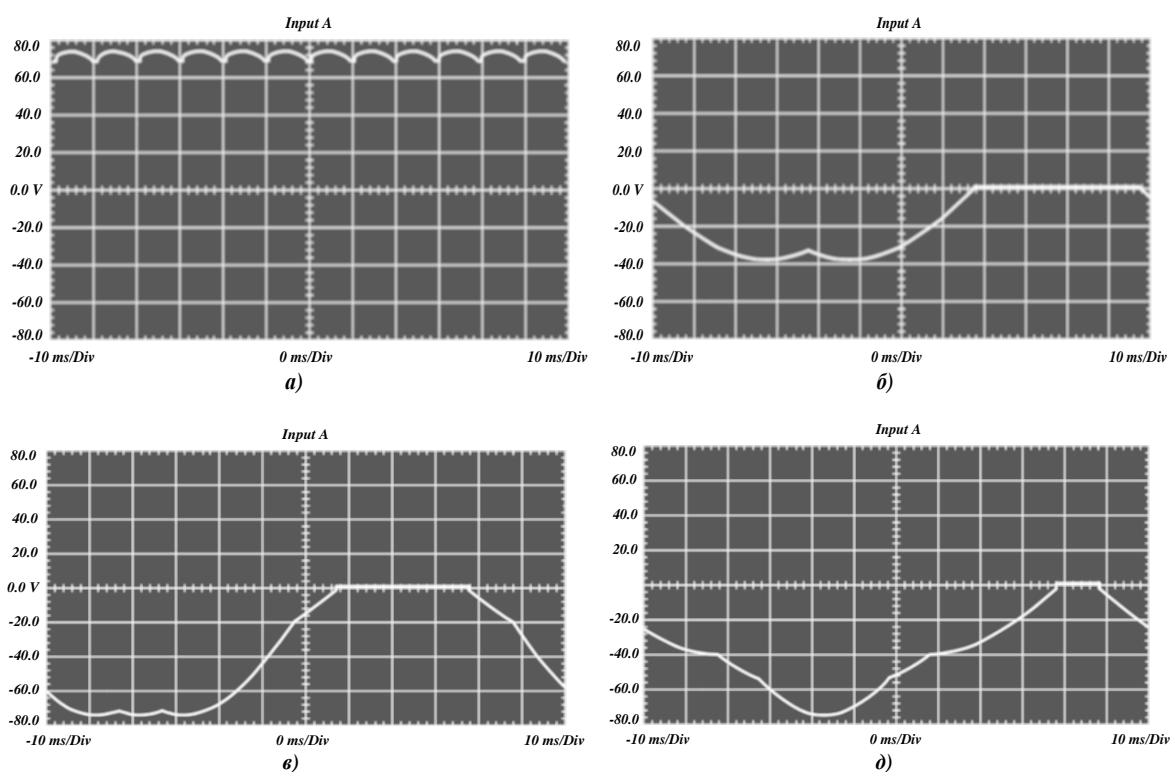


Рисунок 3.23 – Осциллограммы напряжений 12-ти пульсового кольцевого ТВА: *a* – выпрямленное  $U_d$ ; *б* – вентилей анодно-катодной группы ( $120^\circ$ ); *в* – вентилей кольцевой группы ( $90^\circ$ ); *г* – вентилей кольцевой группы ( $30^\circ$ )

Проведенные измерения, с учетом небольшой погрешности, обусловленной условиями эксперимента, подтвердили в соответствии с [107-109] справедливость выражений напряжений и токов  $U_{2Y}/U_{d0}$ ;  $U_{2\Delta}/U_{d0}$ ;  $I_{2Y}/I_d$ ;  $I_{2\Delta}/I$ ; и значения которых подтверждены результатами проведенного компьютерного моделирования.

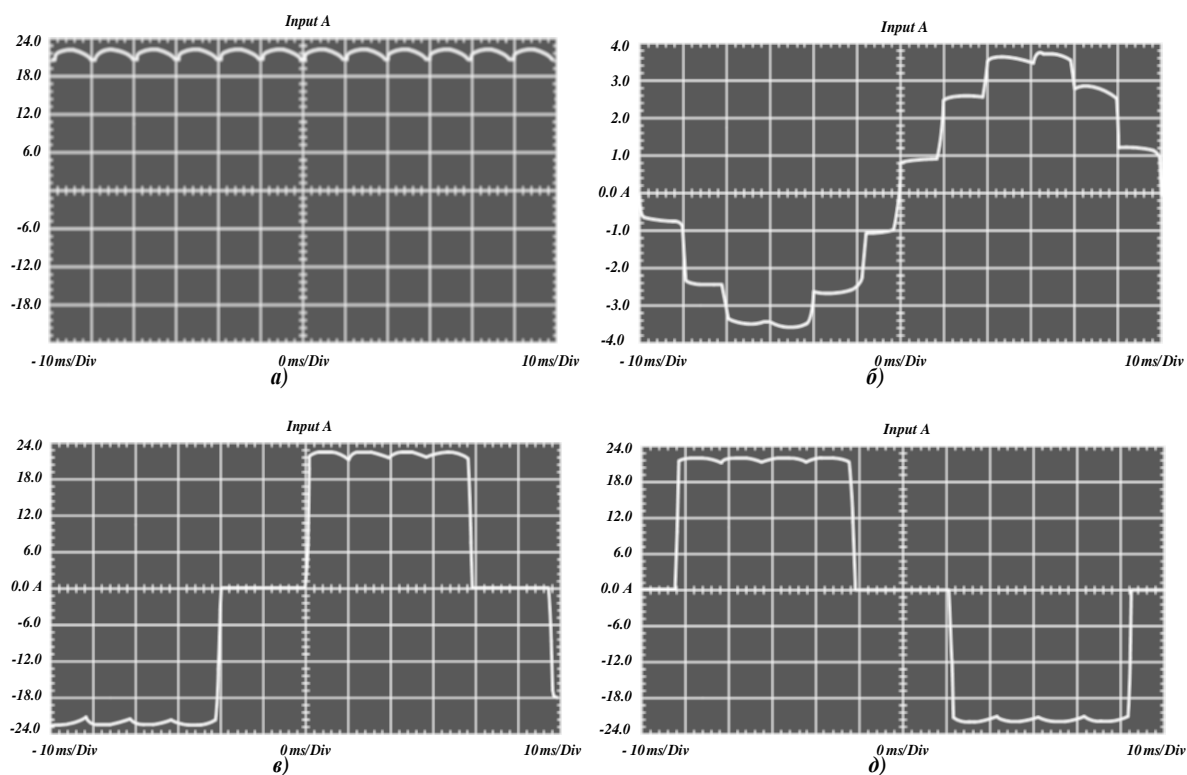


Рисунок 3.24 – Осциллограммы токов 12-ти пульсового кольцевого ТВМ: а) – выпрямленный  $I_d$ ; б) – трехфазной сети  $I_A$ ; в) – ВО «звезда»; д) – ВО «треугольник»

Результатами эксперимента на модели подтверждена достоверность правила определения принадлежности по номерам вентиляй и по углам проводимости анодно-катодных —  $120^0$  эл. град, кольцевых групп —  $90^0$  и  $30^0$  эл. град на (рисунке 3.23, б, в, г). С помощью осциллографа проверены форма кривой и количество пульсаций выпрямленного тока, представленной на (рисунке 3.24.а), которые соответствуют форме и количеству пульсаций при компьютерном моделировании (рисунок 3.3, а), при этом форма потребляемого тока на (рисунке 3.24, б) содержит 12 ступеней.

Кривые токов вентильных обмоток (рисунок 3.24, в, г) практически не отличаются от форм при имитационном моделировании, а амплитуды равны половине действующего тока выпрямителя. Таким образом, в данном выпрямителе действительно двенадцатипульсовое преобразование переменного тока в постоянное.

### 3.2.2 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с последовательным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей

Из результатов проведенных исследований на рисунке 3.25 и рисунке 3.26 следует, что форма кривой выпрямленного напряжения и тока имеет 24 канонических пульсаций (рисунок 3.25, а) за период сетевого напряжения.

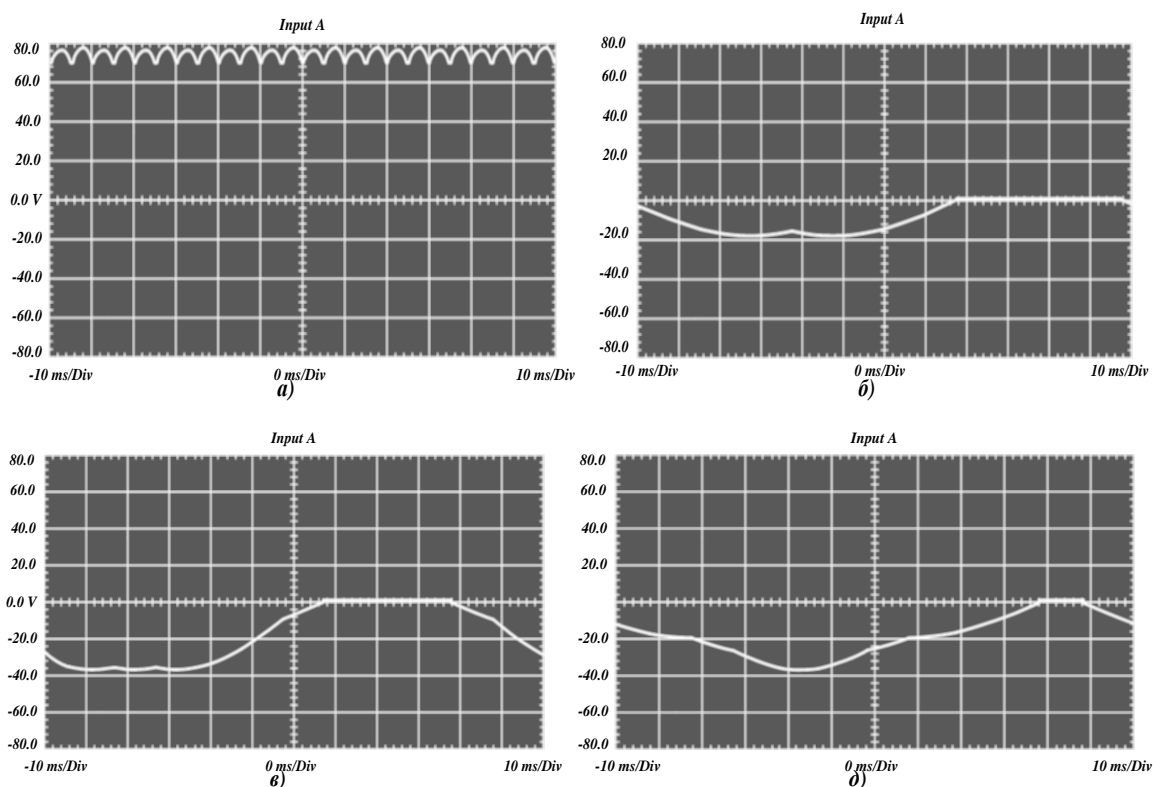


Рисунок 3.25 – Осциллограммы напряжений 24-х пульсового кольцевого ТВА последовательного типа: *а* – выпрямленное  $U_d$ ; *б* – вентилей анодно-катодной группы ( $120^\circ$ ); *в* – вентилей кольцевой группы ( $90^\circ$ ); *д* – вентилей кольцевой группы ( $30^\circ$ )

Подтверждена экспериментально на физической модели справедливость значения напряжений и токов  $U_{2Y}/U_{d0}$ ;  $U_{2\Delta}/U_{d0}$ ;  $I_{2Y}/I_d$ ;  $I_{2\Delta}/I_d$  полученных теоретическим путем (таблица 2.4) и которые проверены на соответствие при компьютерном моделировании, что отражено в [113]. Они соответствуют значениям, полученным при компьютерном моделировании.

Форма кривой выпрямленного тока и количеству пульсаций, представленных на рисунке 3.26), соответствует форме и количеству пульсаций при компьютерном моделировании (рисунок 3.7, а), при этом потребляемый ток на (рисунке 3.26, б) также содержит 24 ступени.

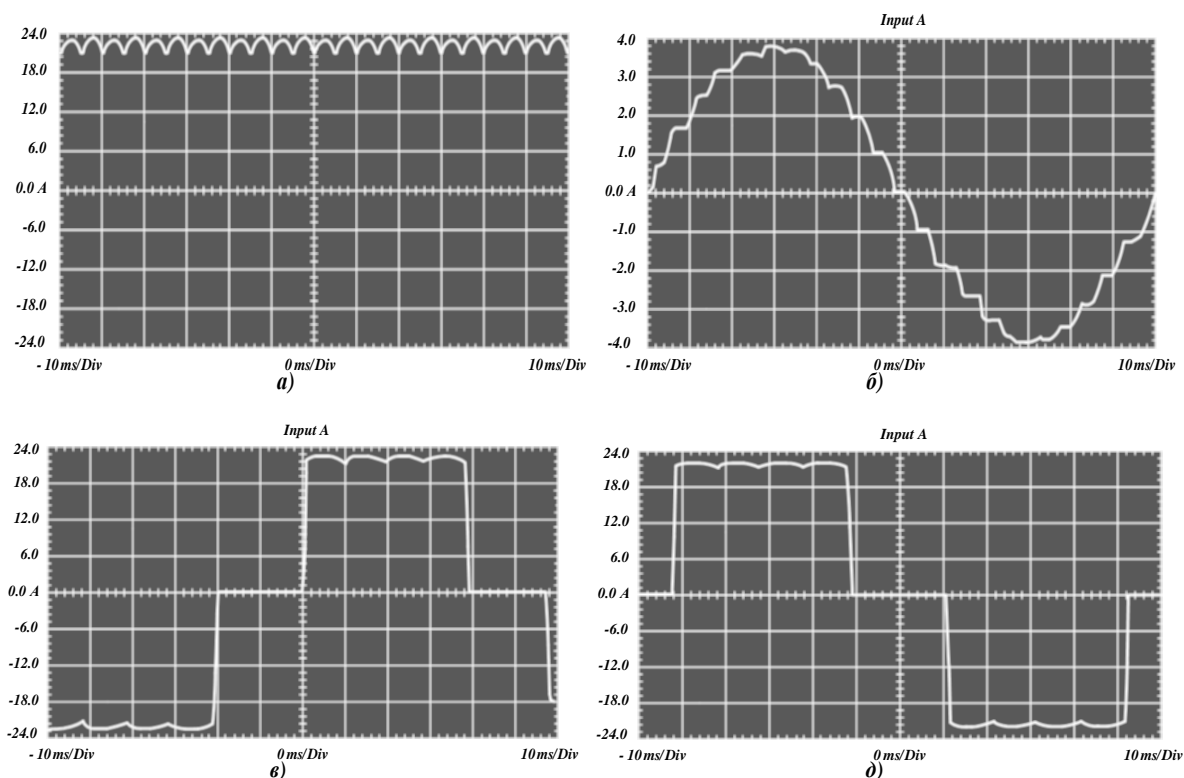


Рисунок 3.26 – Осциллограммы токов 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА последовательного типа: *а* – выпрямленный  $I_d$ ; *б* – трехфазной сети  $I_A$ ; *в* – ВО «звезда»; *д* – ВО «треугольник»

Соотношение амплитуд и формы обратных напряжений анодно-катодных и кольцевой групп, отображенных на (рисунке 3.25, б, в, г), аналогичны соотношению амплитуд и форме обратных напряжений, полученных при имитационном моделировании. Значения углов проводимости вентилях (120, 90, 30 эл. град), а также принадлежность вентилях различной проводимости анодно-катодных и кольцевой групп, полученные на физической модели подтвердили достоверность правил их определения. Кривые токов вентилях обмоток (рисунок 3.24, в, г) практически не отличаются от формы, а амплитуды равны действующему току выпрямителя, что подтверждено результатами имитационного моделирования.

Результаты исследований свидетельствуют, что в данном выпрямителе действительно достигается эквивалентное двадцатичетырех пульсовое преобразование переменного тока в постоянное, при этом действующее напряжение состоит из суммы двух 12 пульсовых действующих напряжений ТВМ, соединенных последовательно.

### 3.2.3 Результаты исследований двадцатичетырех пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с параллельным соединением трансформаторно-выпрямительных модулей

Результаты проведенных исследований приведены на рисунках 3.27 и 3.28. Из которых следует, что форма выпрямленного напряжения имеет 24 пульсации (рисунок 3.26, а) за период сетевого напряжения.

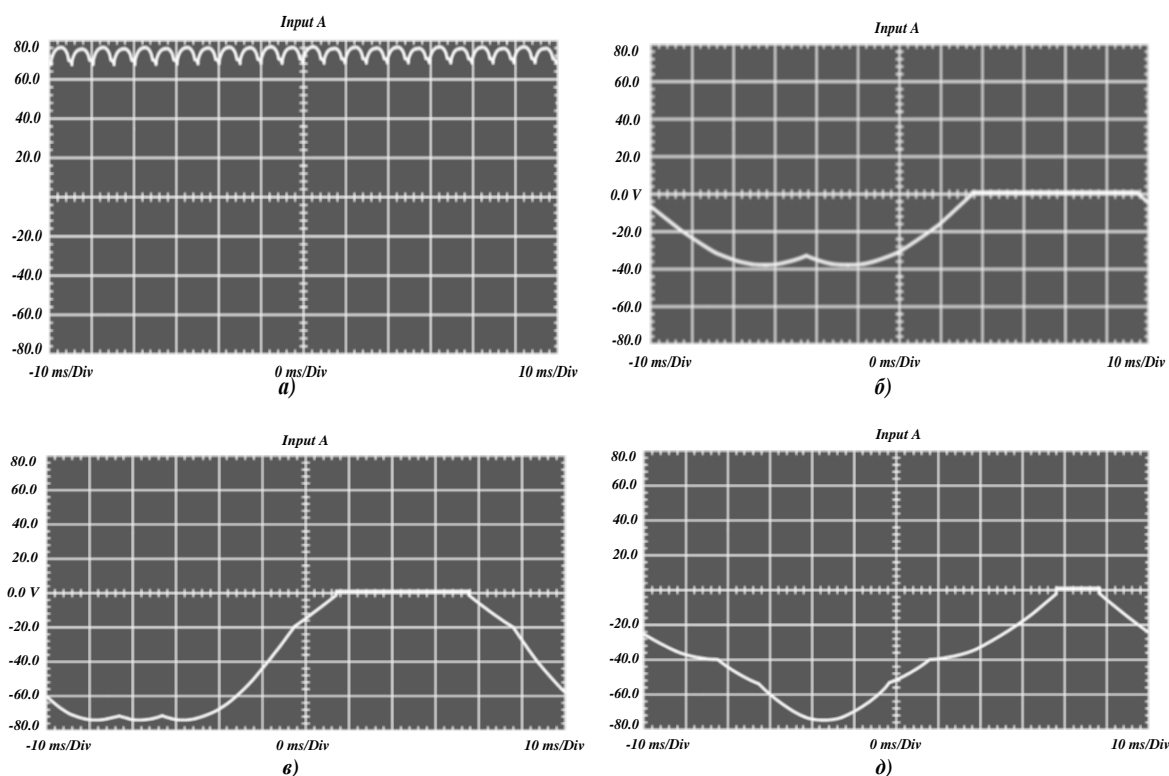


Рисунок 3.27 – Осциллограммы напряжений 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА параллельного типа: *а* – выпрямленное  $U_d$ ; *б* – вентилей анодно-катодной группы ( $105^\circ$ ); *в* – вентилей кольцевой группы ( $75^\circ$ ); *г* – вентилей кольцевой группы ( $15^\circ$ )



Подтверждена экспериментально на физической модели справедливость значения напряжений и токов  $U_{2Y}/U_{d0}$ ;  $U_{2\Delta}/U_{d0}$ ;  $I_{2Y}/I_d$ ;  $I_{2\Delta}/I_d$  полученных теоретическим путем (таблица 2.4) и которые проверены на соответствие при компьютерном моделировании, что отражено в [114]. Соотношение амплитуд и формы обратных напряжений анодно-катодных и кольцевой групп, отображенных на (рисунке 3.27, б, в, г) аналогичны соотношению амплитуд и форме обратных напряжений, полученных при имитационном моделировании. Значения углов проводимости вентилях (105, 75, 15 эл. град), а также принадлежность вентилях различной проводимости анодно-катодных и кольцевой групп полученные на физической модели подтвердили достоверность полученной методики. Форма кривой выпрямленного тока и количеству пульсаций, представленных на (рисунок 3.28), а соответствует форме и количеству пульсаций при компьютерном моделировании (рисунок 3.13.а), при этом потребляемый ток на (рисунок 3.28, б) также содержит 24 ступени.

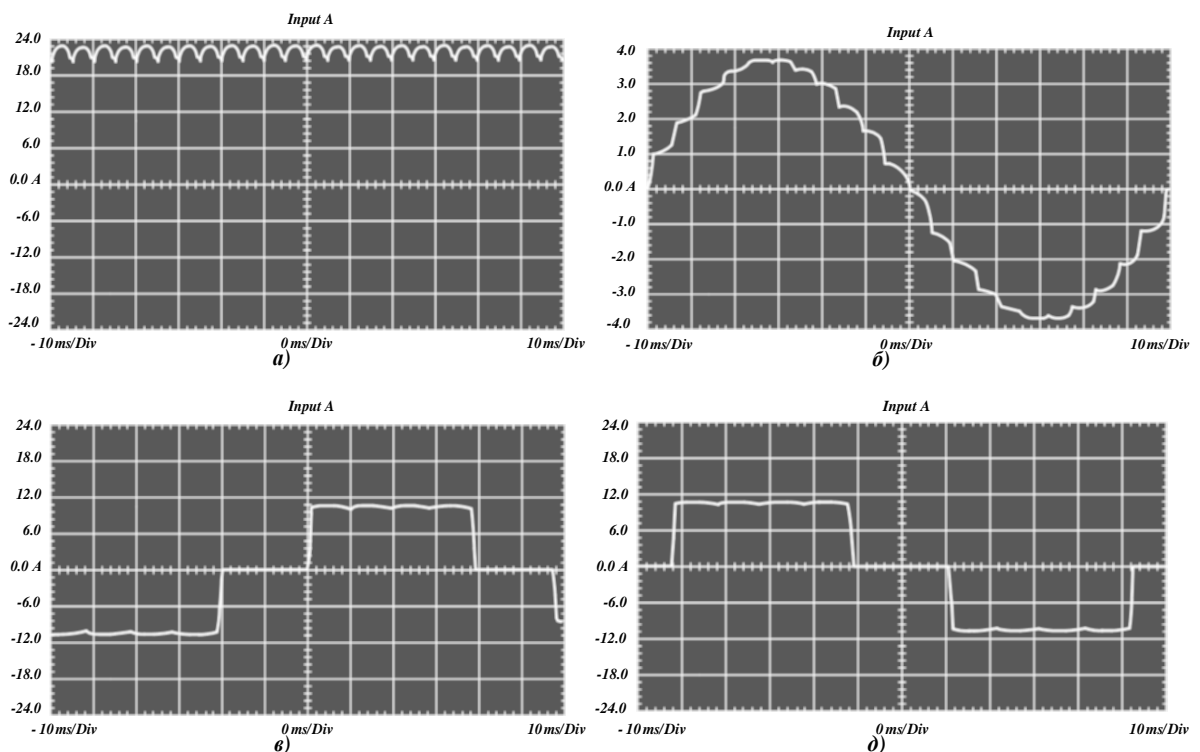


Рисунок 3.28 – Осциллограммы токов 24-х пульсового кольцевого модульного ТВА параллельного типа: *a* – выпрямленный  $I_d$ ; *б* – трехфазной сети  $I_A$ ; *в* – ВО «звезда»; *д* – ВО «треугольник»

Кривые токов вентильных обмоток (рисунок 3.24, в, г) практически не отличаются по форме, а амплитуды равны половине действующего тока выпрямителя, что подтверждено результатами имитационного моделирования. Из выше изложенного следует, что в данном выпрямителе действительно достигается эквивалентное двадцатичетырех пульсовое преобразование переменного тока в постоянное. Которое состоит из суммы двух 12-пульсовых действующих напряжений ТВМ полученных их параллельным соединением, при этом действующий ток в каждом модуле составляет половину общего действующего тока.

Результаты экспериментов на физических моделях (рисунок 3.29) отражают зависимость КПД от значений коэффициента загрузки. Которые характеризуют увеличение КПД ТВА новых схмотехнических решений, в сравнении с выпрямителями 12-ти и 24-х пульсовыми находящимися в эксплуатации. Проведенные эксперименты указывают на сокращение потерь мощности в ТВА нового типа. Необходимо обратить внимание, что суммарное повышение КПД связано не только с сокращением числа вентиляей последовательно обтекаемых током нагрузки, но и снижением тепловых потерь на вентиляях связанной с уменьшением суммарного времени проводимости вентиляей, а также исключением индуктивных реакторов.

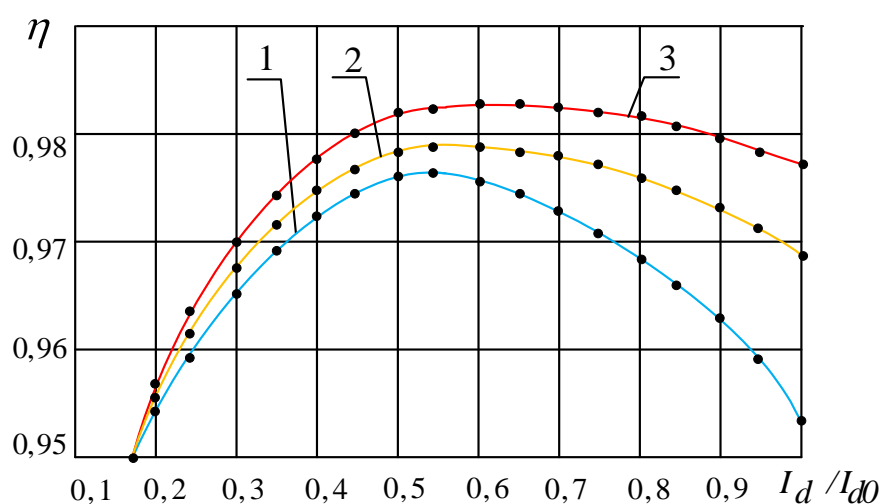


Рисунок 3.29 – Зависимость КПД от нагрузки полученные экспериментально на физических моделях

На рисунок 3.29 приведены кривые отображающие КПД ТВА где:

- № 1 – 12-ти импульсный кольцевой ТВМ;
- № 2 – 24-х импульсный модульный ТВА последовательного типа;
- № 3 – 24-х импульсный модульный ТВА параллельного типа.

Проведенные эксперименты показали, что увеличение числа параллельно соединенных в плече вентилей и использование вентилей с лучшими характеристиками не вызвало заметное увеличение КПД. В результате экспериментов на физических моделях получены данные, устанавливающие зависимость выпрямленного напряжения от величины тока нагрузки (внешняя характеристика), которые отображены в виде диаграмм на рисунке 3.30. Из анализа внешних характеристик (ВХ) следует, что новые схемные решения 24-х импульсные ТВА, по сравнению с 12-ти импульсными выпрямителями обладают меньшим коэффициентом наклона внешней характеристики. Полученные данные также свидетельствуют, что ТВА нового типа обладают лучшими стабилизационными свойствами выпрямленного напряжения. Стабилизация напряжения при максимальных значениях тока нагрузки обуславливает стабилизацию тяговой мощности электропоезда при меньшем токе, что обуславливает уменьшение потерь электроэнергии на элементах электрической тяги постоянного тока.

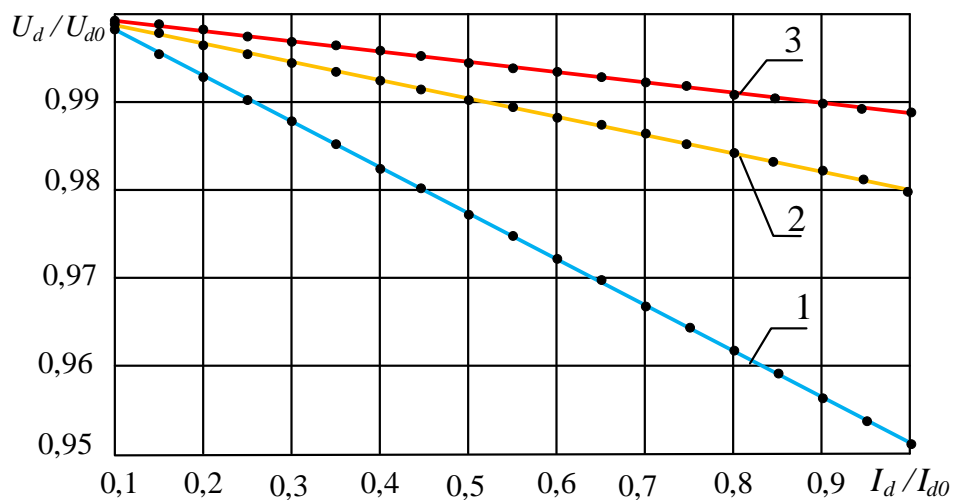


Рисунок 3.30 – Внешние характеристики ТВА полученные экспериментально на физических моделях

Внешние характеристики ТВА отображены на рисунке 3.30, где:

- № 1 – 12-ти импульсный кольцевой ТВМ;
- № 2 – 24-х импульсный модульный ТВА последовательного типа;
- № 3 – 24-х импульсный модульный ТВА параллельного типа

Невысокий уровень выпрямленного напряжения на физической модели по сравнению с напряжением ТВА на ТП, оказывается сопоставимым с прямым падением напряжения на диодах, что затрудняет установление среднего значения коэффициента мощности, с установленной точностью значений экспериментальным путем на разработанных схемотехнических решениях. Но это не исключает вычисления теоретическим путем которое может быть перспективной темой и предметом отдельных исследований. Проведенные измерения в режимах холостого хода при учете погрешностей определяемые условиями эксперимента, подтвердили справедливость выражений полученных теоретическим путем ( $U_{2Y}/U_{do}$ ;  $U_{2\Delta}/U_{do}$ ;  $I_{2Y}/I_d$ ;  $I_{2\Delta}/I$ ) по соответствию значений, полученных в таблице 2.4.

Таким образом с помощью физических моделей были исследованы процессы происходящие в 12-ти и 24-х импульсных модульных ТВА с кольцевыми вентильными схемами и получены следующие результаты:

1. Значения выпрямленного напряжения и тока, обратных напряжений прикладываемых к вентилям анодных и катодных групп, токов вентильных обмоток подтверждают верность соотношений, полученных теоретически в (таблицах 2.2 и 2.4).
2. Определен и подтвержден порядок работы вентиляей с различными углами проводимости анодно-катодных и кольцевых групп и коммутационные углы трансформаторно-выпрямительных агрегатов.
3. Результаты экспериментов на физической модели установили зависимость выпрямленного напряжения от величины нагрузки подтверждающие предположение, что новые схемные решения ТВА, по сравнению с 12-ти импульсными выпрямителями обладают лучшими стабилизационными свойствами выпрямленного напряжения в рабочих режимах работы.

4. Проведенные испытания подтверждают, результаты теоретических исследований о снижении потерь мощности в предлагаемых ТВА в основных режимах работы.
5. В результате проведенных имитационных исследований полностью подтверждены теоретические положения предложенных ТВА при компьютерном и физическом моделировании.

### **Выводы по главе 3**

1. Проведенные экспериментальные исследования на компьютерных и физических моделях подтвердили работоспособность предложенных схемотехнических решений 24-х пульсовых кольцевых модульных ТВА в номинальных и перегрузочных режимах.
2. Подтверждена достоверность результатов теоретических исследований модульных схемотехнических решений ТВА экспериментальными данными компьютерного и физического моделирования.
3. Доказана справедливость предложенной фазо-аналитической методики в среде имитационного моделирования MatLab-Simulink подтвердившее «аномальное» поведение УПВ при параллельном проектировании выпрямителей и использовании кольцевых вентильных структур.
4. Полученные данные, свидетельствующие о сокращении суммарных потерь мощности в ТВА нового типа связаны не только с сокращением числа вентиляей, последовательно обтекаемых током нагрузки, но и уменьшением суммарного времени проводимости вентиляей повышая КПД вентильной структуры соответственно на 25% и на 37% в сравнении существующим 24-х пульсовым выпрямителем.
5. Анализ энергетических характеристик новых модульных ТВА полученных экспериментальным путем свидетельствуют об увеличении энергетического КПД ( $\eta$ ) при последовательном соединении модулей на 0,4% и параллельном на 1,1%, в сравнении с известным 24-х пульсовыми мостовым выпрямителем.

## **Глава 4 ПРИМЕНЕНИЕ ДВАДЦАТИЧЕТЫРЕХ ПУЛЬСОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ НА ТЯГОВЫХ ПОДСТАНЦИЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Потребность в совершенствовании и разработке новых схемотехнических решений ТВА продиктована, прежде всего, необходимостью повышения их энергоэффективности и высокими требованиями, предъявляемыми к качеству электрической энергии. При разработке энергоэффективных многопульсных выпрямителей, коллективом кафедры электротехнические комплексы НГТУ было предложено схемотехническое решение 24-х пульсового ТВА модульного типа [80]. Оно позволяет, уменьшить материалоемкость и трудоемкость изготовления трансформаторного оборудования, а также минимизировать число вентильных плеч в цепи вентильной схемы в соответствии с методами синтеза указанных в [115].

Для эффективного применения 24-х пульсовых ТВА необходимо учитывать следующие особенности многопульсовых выпрямителей:

-Для тяговых подстанций городского электрического транспорта и метрополитена применение 24-х пульсовых ТВА затруднено по причине низкого уровня действующего напряжения, при этом возрастает значение потерь в вентилях выпрямителя, так как в предлагаемом выпрямителе в цепи тока нагрузки три вентильных плеча, а шестипульсовой нулевой схеме, одно и не два, как в 12-ти пульсной схеме параллельного типа;

-В диапазоне применяемых напряжений и мощностей для исполнения двадцатичетырехпульсового ТВА потребуется применение маловитковых обмоток, а выполнить расчетное соотношение между обмотками звезды и треугольника которые используются в предлагаемом выпрямителе при целочисленном исполнении обмоток практически невозможно. А приблизительное соотношение приводит к значительной конструктивной несимметрии, что влечет за собой резкое искажение формы выпрямленного напряжения оно становится неканонической и похожим на двенадцатипульсовое;

-увеличение пульсности выпрямителя максимальные значения коэффициентов мощности приходятся на большие значения коэффициента нагрузки[114];

-рациональность применения многопульсового ТВА подтверждается при больших значениях коэффициента загрузки, при этом приведенные затраты оказываются не велики.

Учет указанных особенностей, а также темпы роста переработки количества электрической энергии тяговыми подстанциями ЖД транспорта постоянного тока, которые по объему переработки количества электрической энергии значительно превосходит переработку электрической энергии тяговыми подстанциями ГЭТ и метрополитена.

Из этого можно сделать вывод, что наибольшая энергетическая эффективность применения 24-х пульсовых ТВА в системе тягового электроснабжения постоянного тока будет достижима именно на тяговых подстанциях постоянного тока ЖД транспорта. Учитывая данное обстоятельство, в настоящей главе рассматривается реконструкция ТВА ЖД транспорта для применения в качестве 24-х пульсовых выпрямителей на основании [117].

#### **4.1 Реконструкция и модернизация трансформаторно-выпрямительных агрегатов тяговых подстанций железнодорожного транспорта**

Наиболее предпочтительными для модернизации такие схемы многопульсных ТВА, которые могут быть реализованы на практике с использованием существующего оборудования не требующей его коренной переделки. Ученые и исследователи Омского института инженеров железнодорожного транспорта в своих трудах показали техническую возможность, также перспективность применения 24-х пульсового выпрямителя на тяговых подстанция постоянного тока [9, 25, 45]. Ими было предложено схемотехническое решение мостового выпрямителя последовательно-параллельного типа формирующего 24-х пульсовое выпрямленное напряжение с применением уравнивающего реактора, которое было реализовано на тяговой подстанции повышенной мощности «Омск» Западно-Сибирской железной дороги. Реализация была осуществлена модернизацией ТВА с преобразовательным

трансформатором ТМРУ-16000/10 и были получены номинальная мощность 11100 кВА, номинальное выпрямленное напряжение, 3300В, номинально выпрямленный ток 3200А и оснащен мостовой вентильной схемой последовательно-параллельного типа в соответствии с [118]. Основные характеристики данного решения ТВА приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Основные характеристики ТВА на базе ТМРУ-16000/10

Тип трансформатора	Характеристики															
	энергетические						трансформаторов					вентилей				
	$U_d, В$	$I_d, А$	$P_d, МВА$	$S_{ном}, МВА$	$\chi, \%$	$\eta, \%$	$S_6 МВА$	$S_T/P_d$	$K_{исп}$	$P_{нагр}, кВт$	$P_{xx}, кВт$	УР	$(\Sigma)N$ вентиляей	Тип схемы	Тип схемы	$N_V$ в цепи тока
ТМРУ-16000/10	3300	3200	10,5	11,1	0,997	0,89	16	1,278	0,722	85	48	105,6 кВт	24	Мостовая 3ф	Последовательно-	4

Данное схемотехническое решение ТВА будет базовым для проведения сравнительной оценки потерь мощности в конструкциях в предлагаемым 24-х пульсовых модульных ТВА, который реконструируется из двух преобразовательных трансформаторов УТМРУ-6300/35ЖУ1. Предлагаемый 24-х пульсовый преобразователь, строится, на основе двух идентичных преобразовательных трансформаторов [58, 59, 60]. Трансформаторы нагружены каждый на свою вентильную схему кольцевого типа, которые также идентичны. Каждый трансформатор со своей вентильной схемой образуют самостоятельный 12-ти пульсовый выпрямительный модуль. Модули идентичны, их выводы постоянного тока соединены между собой параллельно при этом формируют 24-х пульсовое



выпрямленное напряжение. Параллельное соединение выпрямительных модулей позволяет увеличить выпрямленный ток вдвое, что позволяет использовать в паре преобразователи меньшей мощности.

На этапе внедрения предлагаемого двух модульного 24-х пульсового ТВА необходимо, определить характеристики одного преобразовательного модуля. Технические характеристики для одного модуля определены из в таблиц 2.4 и 4.1 и представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Характеристики 12-ти пульсового ТВМ

Характеристики										
энергетические			трансформаторного оборудования							
$U_d$ , В	$I_d$ , А	$P_d$ , мВА	$U_{2Y}/U_{do}$	$U_{2\Delta}/U_{do}$	$I_{2Y}/I_d$	$I_{2\Delta}/I_d$	$I_{1Z}/I_d$	$S^*_1$	$S^*_2$	$S^*_T$
3300	1600	5,28	0,214	0,37	0,816	0,4714	1,576 / $K_T$	1,125	1,047	1,086

Необходимо определить трансформаторное оборудование, которые отвечает требованиям таблицы 4.2. Параметры преобразовательных трансформаторов, применяемых на ТП ЖД транспорта, приведены в таблице. 4.3. Необходимо отметить, исходя из идентичности ТВМ расчеты будут проведены только для одного 12-ти пульсового ТВМ. Определив преобразовательный трансформаторов и вентильные схем рассчитаем характеристики в целом 24-х пульсового ТВА модульного типа.

#### **4.1.1 Выбор и модернизация трансформаторного оборудования для формирования двенадцати пульсового выпрямительного модуля**

На тяговых подстанциях постоянного тока ЖД транспорта широко использовались серийно выпускаемые 6-ти пульсные ТВА, состоящие из трёхфазных трансформаторов с расщепленными вторичными обмотками, и вентильных блоков собранных по нулевым мостовым схемам выпрямления, оптимально подходящих для модернизации. Такая конструкция упрощает переход к схемным решениям с увеличенной частотой пульсаций посредством модернизации имеющегося

оборудования располагающего заданными техническими характеристиками и располагающего необходимыми конструктивными особенностями узлов [118].

К уже рассмотренным преимуществам 12-ти пульсовых выпрямителей, необходимо добавить объективные преимущества модернизации трансформаторов для таких преобразователей. Это возможность применения трансформаторов использовавшихся в 6-ти пульсовых нулевых схемах выпрямления. Важным моментом является расположение вторичных обмоток в верхнем слое обмоток, что значительно облегчает проведение модернизации вентильных обмоток, связанное с изменением их числа витков. Так как потребуется реконструкция существующих вентильных конструкций в новую схему выпрямления на базе существующих диодов, то это сводит к минимуму затраты на модернизацию существующего оборудования. Практически все вентильные сборки, предусмотренные для 6-ти пульсовых нулевых мостовых схем выпрямления, после соответствующей модернизации могут быть использованы для 12-ти пульсовых мостовых схем последовательного типа.

На этапе внедрения предлагаемого 12-ти пульсового ТВМ необходимо осуществить рациональный выбор преобразовательного трансформатора. Технические характеристики преобразовательных трансформаторов, которые используются в качестве ТВА на тяговых подстанциях постоянного тока железнодорожного транспорта [96], представлены таблицей 4.3.

Выбор преобразовательного трансформатора - это наиболее ответственная задача. Не всякий трансформатор, имеющий расщеплённую вторичную обмотку (ВО), подходит для модернизации. Из представленных в таблице 4.3 тяговых трансформаторов по предварительным расчетам, в большей степени подходит УТМРУ-6300/35ЖУ1 для проведения реконструкции под 12-ти пульсовый ТВМ, так как аналогичные тяговые трансформаторы используются на ТП ГЭТ и метрополитена, это позволит методику модернизации для указанных ТВА.

Только на тяговых подстанциях Западно-Сибирской ж.д. сохранилось не менее 3-х десятков таких трансформаторов. Кроме того, имеется не менее 10 трансформаторов типа ТМРУ-6300/35ЖУ1, пригодных для реконструкции. Также подходят трансформаторы, находящиеся в эксплуатации ТМРП-6300/35ЖУ1.

Таблица 4.3 – Основные характеристики тяговых трансформаторов

Технические характеристики	Типы преобразовательных трансформаторов		
	ТРМП-6300/35	ТМРУ-6300/35	УТМРУ-6300/35
Схемотехнические решения	12-ти пульсовая, Ларионова последовательного типа	6-ти пульсовая, две обратные звезды+УР	6ти пульсовая, две обратные звезды+УР
$P_{ном}$ , кВА	5700	4640	3700
Ток ВО, А	443	361	289
Напряжение ВО, В	1310	3020	3020
Напряжение к.з., %	7,5	6,7	10,7
Нагрузочные потери, кВт	39	41	29,6
Потеря х.х., кВт	9	10	13
Ток х.х., %	0,77	0,95	0,95
$I_{дном}$ , А	1600	1250	1000
$U_{дном}$ , В	3300	3300	3300

Трансформатор УТМРУ-6300/35ЖУ1 предназначен для работы по нулевой 6-ти пульсовой схеме и содержит уравнильный и сглаживающий реакторы. Его обмотки имеют переплетенное выполнение. На каждом стержне расположено по 36 катушек по 14 витков: обмотки «прямой звезды» – 18 катушек; обмоток «обратной звезды» – 18 катушек. При этом «звезда» состоит из 3-х ветвей катушек в каждой ветви 6 последовательно включенных катушек. Таким образом, число витков обмотки равно 84. К уже рассмотренным выше преимуществам 12-ти пульсовых выпрямителей, необходимо добавить объективные преимущества модернизации трансформаторов для таких выпрямителей. Это возможность использования и снятых с эксплуатации, но сохранивших свои основные характеристики «старых трансформаторов», использовавшихся в 6-ти пульсовых нулевых схемах выпрямления.

#### *Определение чисел витков обмоток и типовой мощности трансформатора*

Все электрические параметры обмоток ВН и НН для исходного трансформатора, которые необходимы при расчете реконструированного

трансформатора, взяты из рабочих чертежей завода-изготовителя [96]. Известно, что номинальное выпрямленное напряжение  $U_{дн} = 3300$  В. В исследовании [96] показано, что при баковой мощности 16 МВА трансформатора напряжение холостого хода для 6-ти, 12-ти пульсовых схем выпрямления должно превышать номинальное примерно на 100В, а при баковой мощности 6,3 МВА на 232 В и более (рисунок 4.1).

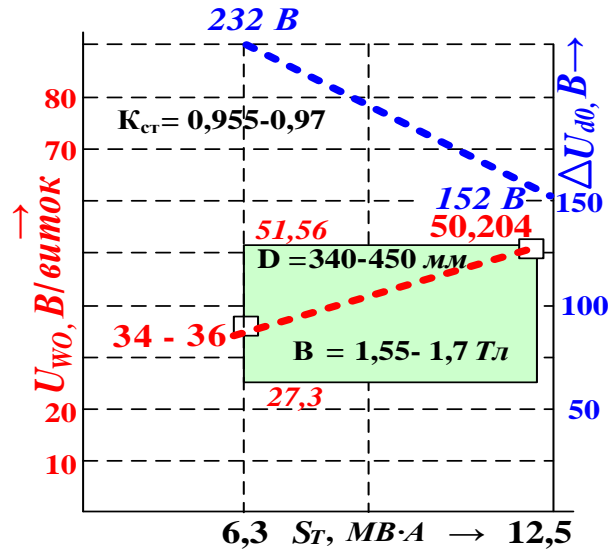


Рисунок 4.1 – Зависимость числа вольт на виток

При 12-ти пульсовом выпрямлении жёсткость внешней характеристики возрастает, и это превышение можно взять меньшей величины. Но, модернизация трансформатора, проведённая не в заводских условиях, приводит к увеличению напряжения короткого замыкания  $u_K$  трансформатора и, как следствие, к заметному увеличению коммутационных потерь в новом 12-ти пульсовом ТВМ. Поэтому примем данное превышение равным 232 В. Таким образом:

$$U_{d0} = U_{dxx} + 232 \text{ В} = 3500 \text{ В} + 232 \text{ В} = 3732 \text{ В}.$$

Получим максимальное значение выпрямленного напряжения:

$$U_{d \max} = \frac{U_{d0}}{\frac{m_q}{\pi} \sin \frac{\pi}{m_q}} = \frac{3732 \text{ В}}{0,9889} \approx 3773 \text{ В},$$

Из векторных диаграмм на Рис. 2.15 определяем напряжение которое соответствует значению 3,346 относительных единиц (о.е.) топологического размера обмотки, который можно соотнести как с числом витков обмотки, так и с

напряжением на ней (амплитудным или действующим значением). В этом случае одной 1,0 о.е. соответствует напряжение с амплитудой

$$U_{\max} = \frac{3773\text{В}}{3,346} = 1127\text{В}$$

Или, действующее значение напряжения на вторичной обмотке с топологическим размером 1,0 о.е.

$$U_{2\lambda} = \frac{1127\text{В}}{\sqrt{2}} = 796\text{В}$$

Действующее значение напряжения для обмоток треугольника (1,732 о.е.)

$$U_{2\nabla.м} = 796\text{В} \cdot 1,732 = 1378\text{В}$$

Имея для трансформатора УТМРУ-6300/35-ЖУ1 (при номинальном сетевом линейном напряжении 35 кВ) напряжение  $U_2 = 3020\text{В}$  на фазной обмотке из  $W_2 = 84$  витков, легко определить число вольт, приходящихся на один виток (э.д.с. одного витка). Оно составляет  $U_w = 35,95\text{В/вит}$ .

В первую очередь необходимо поделить первичную обмотку каждого стержня на сетевую и фазосдвигающую части для получения отвода вместе их соединения, чтобы произвести пересоединение первичных обмоток в схему «скользящий треугольник». Такое соединение первичных обмоток при соотношении сетевой и фазосдвигающей частей как 1:0,19 из [80] создает фазовый сдвиг между трансформаторами 15 эл. градусов. Из соотношения 1:0,19 и  $U_w = 35,95\text{В/вит}$  получаем  $W_c = 278$  вит, и  $W_\phi = 54$  вит. Из полученного соотношения числа витков следует, что конец сетевой и начало фазосдвигающих обмоток приходится на отвод первичной обмотки «10000В», а конец фазосдвигающей обмотки должен отстоять от отвода «10000В» на 54 вит в сторону увеличения. Для получения отвода конца фазосдвигающей обмотки необходимо, отвод первичной обмотки «6000В» отпаять и переместить его в расчетное место и припаять его там. Начало обмоток  $W_c$  в нулевой точке рассоединяются и производится их соединение по схеме «треугольник» с проходными изоляторами ввода СО «10000В» противоположных фаз, которые являются отводами средних точек, соединяющими сетевую и фазосдвигающую обмотки. Концы  $W_\phi$  обмоток подсоединены к проходным изоляторам ввода СО

«6000В», поэтому необходимо отсоединить сетевые клеммы 6000В от проходных изоляторов ввода СО «6000В», и на их место подключить сетевые клеммы 10000В предварительно отключив их от своих изоляторов.

Теперь определим число витков для всех вторичных обмоток, разделив выше приведённые значения напряжений на э.д.с. одного витка. Они равны

$$W_{2\lambda} = \frac{796}{35,95} \approx 22, \text{ вит}; \quad W_{2\nabla} = \frac{1330}{35,95} \approx 38 \text{ вит.}$$

При таком соотношении витковых чисел несимметрия конструктивная ( $\alpha_K$ ) не превышает 0,28 %, что является наименьшим в соответствии [18, 56] и отображено на таблице 4.4, так как суммарная конструктивная несимметрия при параллельной работе преобразовательных модулей не превысит 0,56 % это очень хороший результат. В электрических единицах измерения, учитывая то, что обмотка «звезда» имеет 22 витка, треугольник – 38 витка, а ЭДС одного витка равна 35,95В, получим уточнённые значения напряжений обмоток

$$U_{2\nabla} = 38 \cdot 35,95 = 1378 \text{ В};$$

$$U_{2\lambda M} = 22 \cdot 35,95 = 796 \text{ В.}$$

При одновременном изменении схемы выпрямления необходимо провести перерасчет типовой мощности трансформатора. В том случае, если расчётная мощность не превысит значение типовой мощности трансформатора УТМРУ-6300/35-ЖУ1, модернизация выпрямительного агрегата будет считаться обоснованной.

Таблица 4.4 – Величина несимметрии базовых обмоток в зависимости от чисел витков

Схемы обмоток	Значения витков	Числовые значения витков												
		31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Δ	1,0(W <sub>2</sub> )	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Y	0,577	18	18	19	20	20	21	21	22	23	23	24	24	25
Конструктивная несимметрия, %		0,57	2,58	0,28	1,89	1,03	1,04	1,7	0,28	2,15	0,41	1,39	1,03	0,7

Для определения типовой мощности трансформатора в кВА необходимо полученный во второй главе коэффициент установленной мощности трансформатора умножить на мощность нагрузки  $P_d = I_d U_d$ . При токе преобразователя 1600 А и напряжении 3300 В, то  $P_d = 5280$  кВА, тогда

$$S_T = 1,096 * 5280 = 5786, \text{ кВА.}$$

Баковая мощность трансформатора УТМРУ-6300/35 равна 6300 кВА, при этом учитывалась мощность уравнивающего и сглаживающих реакторов, ориентировочно 26% от типовой мощности преобразовательного трансформатора). Типовая мощность трансформатора в этом случае ориентировочно составляет 5700–5800 кВА. Таким образом, при предлагаемой модернизации очевидно мощность применяемого трансформатора относительно требуемой по расчёту величины совпадает. Он может быть рекомендован к работе с предлагаемой схемой выпрямления.

Расчётная величина мощности соответствует реальной типовой мощности трансформатора УТМРУ-6300/35, что говорит о правильности выбора схемного решения выпрямителя. Значительное различие объясняется тем, что трансформатор использовался в неэффективной нулевой 6-пульсной схеме, для которой велико значение типовой мощности.

### *Реконструкция обмоток трансформатора*

Исходная схема их соединения до реконструкции показана на рисунке 4.2. Определив выше числа витков обмоток НН трансформатора, равные, соответственно, для звёзды 22, а для малых звёзд – 38, необходимо рассмотреть возможность использования уже имеющихся в трансформаторе обмоток. На каждом стержне трансформатора УТМРУ-6300/35 имеется две обмотки, каждая состоит из 18 катушек в каждой катушке по 14 витков.

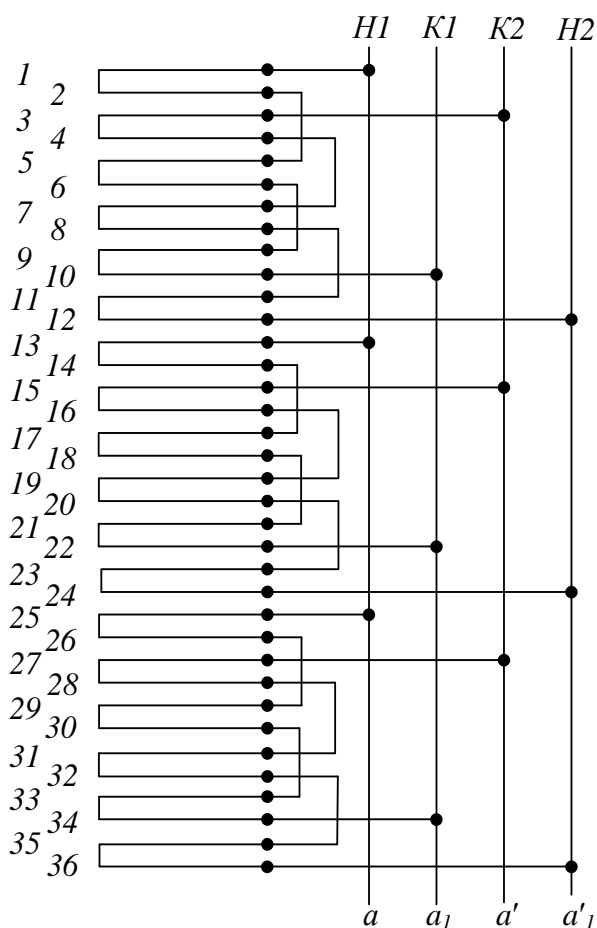


Рисунок 4.2 – Схема построения вентиляльных обмоток трансформатора УТМРУ-6300/35 для одного стержня трансформатора до реконструкции.

Модернизируем обмотку прямой «звезды» в расчетную обмотку «треугольник». На обмотку прямой «звезды» выделено 18 катушек. Где суммарное сечение проводов трёх параллельно соединённых ветвей (по 6 последовательно соединённых катушек) из катушек позволяло в исходном варианте выдерживать ток  $I_2 = 289\text{A}$ . Таким образом, одна ветвь катушек рассчитана приблизительно на расчетный ток  $0,181 \cdot I_d$ . Тогда, для обмоток составляющих треугольник при расчетном токе  $0,471 \cdot I_d$ , из (таб.2.2.2) потребуется 3 ветви. В каждой ветви, в соответствии проведенных расчетов (4.5) необходимо 38 витков, т.е. 3 катушки в каждой ветви, при этом на одной катушке в каждой ветви удаляем 4 витка.

Модернизируем обмотку обратной «звезды» в расчетную обмотку «звезда». На обмотку обратной «звезды» выделено 18 катушек. Где также суммарное сечение проводов трёх параллельно соединённых ветвей (по 6 последовательно соединённых катушек) выдерживает ток  $I_2 = 289\text{A}$ , Таким образом, одна ветвь катушек рассчитана



приблизительно на расчетный ток  $0,181 \cdot I_d$ . Для расчетных обмоток «звезда» ток из (таб.2.2.2) составляет  $0,816 \cdot I_d$ , тогда потребуется 5 ветвей. В каждой ветви необходимо, в соответствии проведенных расчетов (4.5) необходимо 22 витков, т.е. по 2 катушки в каждой ветви, при этом на одной катушке в каждой ветви удаляем 6 витков.

На стержне для обмотки «треугольник», при токах в них, равных  $0,4714 \cdot I_d$ , потребуется 3 ветви состоящей из трех катушек в каждой ветви при этом на каждой третьей катушке удаляем по 4 витка, т.е. требуется 9 катушек.

На стержне для частей обмоток, составляющих «звезду», при токах в них, равных  $0,816 \cdot I_d$ , потребуется 5 ветвей по две катушки в каждой ветви при этом на каждой второй катушке удаляем по 6 витков, т.е. требуется 10 катушек.

На стержне для двух таких обмоток, требуется 19 катушек, сравнивая, число требуемых катушек и имеющихся на стержне приходим к выводу, что требуемое количество катушек, не превышает количество имеющихся катушек.

Таким образом, выполнение обмоток для создания двух трехфазных симметричных систем напряжений сдвинутых относительно друг друга на  $30^0$  эл. градусов возможно на базе имеющегося обмоточного материала на выбранном трансформаторе.

Схема расположения обмоток после модернизации представлена на рисунке 4.3.

Встроенные в тяговые трансформаторы уравнивательные реакторы не подлежат реконструкции, по этому их можно не демонтировать только отключить, а их выводы используем. Дополнительные выводы подсоединяют к проходным изоляторам ( $I_{ном}=1500$  А) от УР и дополнительным изоляторам, устанавливаемым на крышке трансформатора.

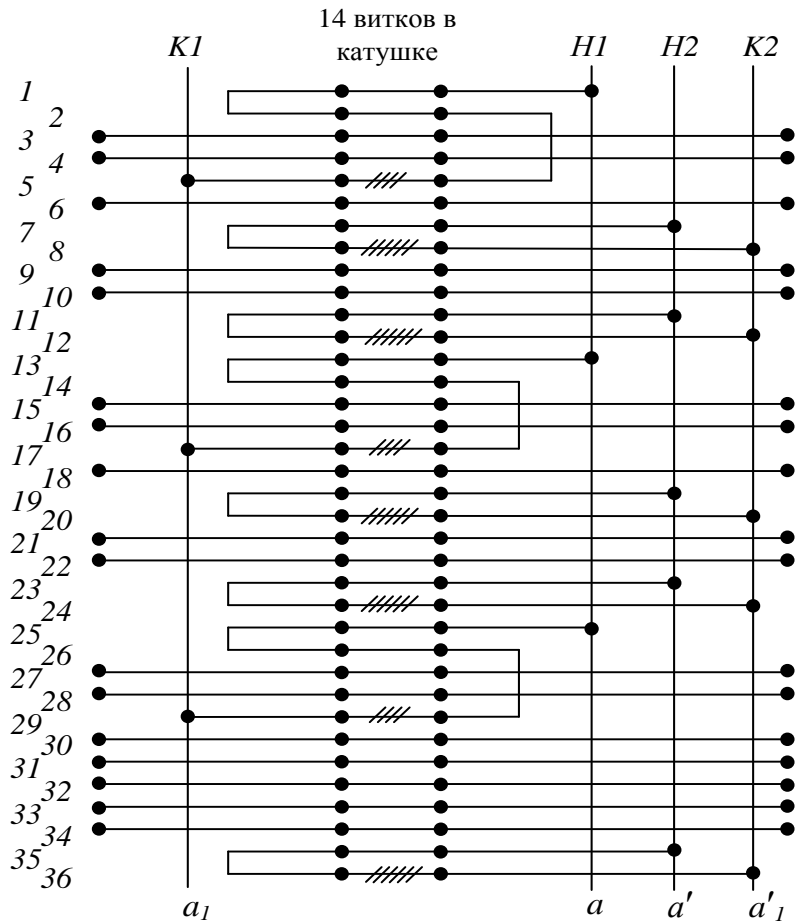


Рисунок 4.3 – Схема соединения вентильных обмоток трансформатора УТМРУ-6300/35 на стержне А после реконструкции

Проходные изоляторы для выводов ВО предусматривают на ток  $I_2 \geq I_d \sqrt{2/3}$ .

При реконструкции должны быть усилены также шины от выводов ВО до проходных изоляторов. Результаты модернизации преобразовательного трансформатора сведены в таблицу 4.5.

Таким образом, модернизация ТВА на базе трансформатора УТМРУ-6300/35ЖУ в 12-ти пульсовый ТВМ с кольцевой вентильной схемой может быть проведена.

Модернизированный трансформатор содержит шесть обмоток НН, три из которых соединены в «треугольник», а оставшиеся три в «звезду» благодаря чему их линейные напряжения, сдвинуты относительно друг друга на  $30^0$  эл. градусов и создают симметричную шестифазную систему, необходимого для питания 12 пульсовой вентильной конструкции кольцевого типа.

Таблица 4.5 – Основные характеристики модернизированного 12-ти пульсового ТВМ

Характеристики 12-ти пульсового ТВМ на базе модернизированного УТМРУ-6300/35								
$U_d$ , В	$I_d$ , А	$P_d$ , мВА	$S_{ном}$ , мВА	$S_6$ , мВА	$S_T / P_d$	$K_{исп}$	$P_{нагр}$ , кВт	$P_{хх}$ , кВт
3300	1600	5,28	5,8	6,3	1,096	0.936	29.6	13

#### 4.1.2 Предложения по реконструкции нулевой мостовой вентильной схемы в кольцевую двенадцати пульсовую структуру

ТВА на базе трансформатора УТМРУ-6300/35ЖУ1 оснащен вентильным преобразователем ПВЭ-5АУ1. Повышение технико-экономических показателей ПВЭ-5АУ1 было достигнуто уменьшением количества диодов за счет использования лавинных диодов ВЛ-200-10, а простота их обслуживания за счет использования естественного воздушного охлаждения. Выпрямитель ПВЭ-5АУ1 состоит из 6 вентильных шкафов, которые соединены между собой по шестифазной нулевой схеме отображенной на рисунке 4.4, а. Каждый шкаф состоит из пяти параллельных ветвей диодов, каждая ветвь представляет собой последовательное соединение 14 штук диодов которые расположены вертикально 7 штук с левой стороны шкафа и 7 штук с правой стороны.

Для использования ПВЭ-5АУ1 в качестве двенадцатипульсовой кольцевой схемы по сторонам шкафа дополнительно размещаем по одному горизонтальному ряду диодов с охладителями. А на другой стороне шкафа меняем направление диодов. Выводы анодные (А) и катодные (К) одноименные объединяем а затем подключаем к проходным изоляторам, а по середине полуфаз вентильных блоков устанавливаем переключки, которые соединяют пять ветвей диодов на всех блоках. После этого подключаем их поочередно первые три к одной из фаз вторичных обмоток первой группы преобразовательного трансформатора, а следующие три к другой из фаз вторичных обмоток второй группы преобразовательного трансформатора.

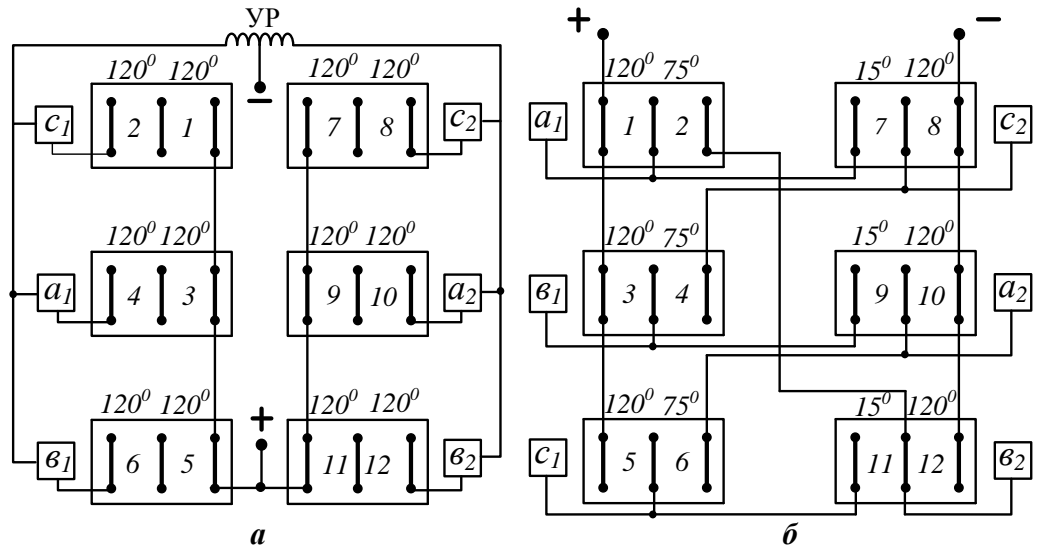


Рисунок 4.4 – Схемы электрических соединений вентильных шкафов: а - до модернизации; б - после предлагаемой модернизации

Аноды полуфазных вентильных плеч объединяют на общем анодном выводе. Такое решение позволяет три шкафа из шести шкафов выпрямителя после реконструкции представлять одно плечо анодной группы и одно плечо кольцевой группы ( $75^{\circ}$  эл. град.), а три других шкафа одно плечо катодной группы и одно плечо кольцевой группы ( $15^{\circ}$  эл. град.) при этом они подключены к одной трехфазной вторичной обмотке трансформатора, а три — к другой трехфазной вторичной обмотке. Такие действия по реконструкции вентильных блоков ПВЭ-5АУ1 продляют его работу в новом качестве 12-ти импульсного кольцевого выпрямителя.

Для перехода к кольцевой схеме выпрямления возможно при модернизации оборудования вентильных шкафов мостового выпрямителя. Шестипульсовые схемы выпрямления находящиеся в резерве сохранили необходимые электрические параметры выпрямительных диодов. Реконструкция существующих схемных решений в 12-ти импульсные мостовые схемы отработана на практике по существующей методике по переоборудования вентильных схем [14], которая может быть использована и для перехода к кольцевым схемным построениям. Для построения кольцевых схем выпрямления используем имеющихся диодов ВЛ-200 схема применения отображена на рисунке 4.4, б, при проведении сравнительных расчетов с существующим 24-х импульсным ТВА последовательно-параллельного типа

используем диоды ДЛ133-500. Блок-схема выпрямителя показана на рисунке 4.4, б (шкафы выделены прямоугольниками). Базой построения вентильной схемы является круговая топология основанной на двух трехфазных системах напряжений вентильных обмоток соединенных звездой, другой – треугольником, которые по постоянному току соединяются посредством шестифазной кольцевой вентильной схемы последовательно. Смысл модернизации для снижения потерь мощности в вентильной конструкции заключается в обобщении внутренних анодных и катодных групп для двух последовательно соединенных мостов. Что сокращает число однотипных вентильных плеч, которые последовательно обтекает выпрямляемый ток нагрузки  $I_d$  с 4-х (рис.4.4а) до 3-х. При этом содержание вентильной конструкции ПВЭ-5АУ1 сохраняется, а меняется схема электрических соединений внутри вентильного блока. Число диодов при такой модернизации в последовательной цепи тока сокращается с 56 до 42 диодов.

В нормальном режиме работы шесть вентильных плеч анодно-катодной группы кольцевой схемы, присоединенных к положительным и отрицательным выводам выпрямителя, испытывают воздействие обратных напряжений, которые равны напряжениям в мостовых схемах ( $0,524 \cdot U_{d0}$ ). При этом к кольцевым вентильным плечам прикладывается обратное напряжение большее ( $1,013 U_{d0}$ ), т.е. 3580,7 В на пять диодов 10 класса, у которых максимальный уровень обратного напряжения 5000 В. И так запас по обратному напряжению понижается с уровня 2,77 до уровня 1,564. Такой запас является достаточным, при этом облегчаются условия работы вентильных плеч по току: три работают  $15^\circ$  эл. град., а другие три  $75^\circ$  эл. град., в сравнении с анодно-катодными группами  $120^\circ$  эл. град., что не снижает их надежность.

Расчет потерь мощности в СПП в модернизированной вентильной схеме проводился в сравнении с действующим 24-х пульсовым ТВА с мостовой вентильной конструкцией последовательно-параллельного типа результаты расчётов представлены в таблице 4.6. Для определения потерь в мостовой схеме использовался один тип СПП (ДЛ133-500 класс 10) по формуле:

$$\Delta P_B = \frac{p}{3} \cdot s \cdot U_{To} \cdot I_d + \frac{p \cdot s}{3 \cdot a} \cdot I_d^2 \cdot r_T,$$

Таблица 4.6 – Мощности потерь в СПП выпрямительных секций

Тип вентильной схемы	Число СПП в плече		Число плеч в цепи тока	Число СПП в цепи тока	Потери мощности в СПП при следующих значениях загрузки $K_3$ , кВт		
	$s$	$a$			0,22	0,25	0,4
Мостовая	4	6	4	16	9,95	11,39	18,87
Кольцевая	4	6	3	12	7,46	8,54	14,15

Для модернизированного варианта по кольцевой вентильной конструкции расчет проводился по формуле

$$\Delta P_B = \left(\frac{p}{6} + 1\right) \cdot s \cdot U_{TO} \cdot I_d + \left(\frac{p}{6} + 1\right) \cdot \frac{s}{a} \cdot I_d^2 \cdot r_T.$$

Результаты расчетов потерь мощности в вентильных конструкциях анализируемых схемных решений в зависимости от нагрузки представлено на графике (рисунок 4.5).

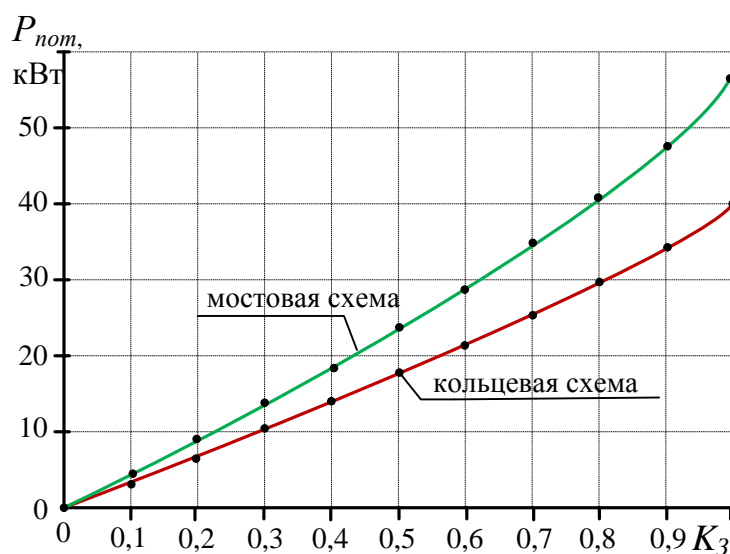


Рисунок 4.5 – Потери мощности в вентильных конструкциях 24-х импульсных ТВА с мостовой и кольцевой схемами выпрямления

Из (таблиц 4.6 и 4.7) следует, что замена ныне действующего 24-х пульсного ТВА с мостовой вентильной конструкцией последовательно-параллельного типа на тяговой подстанции «Омск» с диодами ДЛ133-500 на предлагаемый 24 пульсовый модульный выпрямитель параллельного типа с кольцевой вентильной конструкцией с теми же диодами показывает о снижении мощности потерь в вентильных конструкциях.

Таблица 4.7 – Сравнимые характеристики 24-х пульсовых ТВА

Типы преоб-х транс-ров	Характеристики													
	энергетические						трансформаторного оборудования				Вентиль-ной части			
	$U_d, В$	$I_d, А$	$P_d, МВА$	$S_{ном}, МВА$	$\chi, \%$	$\eta, \%$	$S_6 МВА$	$S_T/P_d$	$K_{исп}$	$P_{нагр}, кВт$	$P_{xx}, кВт$	$УР$	Типы вентильных схем	$N_V$ в цепи тока
ТМРУ-16000	3300	3200	10,5	11,1	0,997	0,89	16	1,278	0,722	85	48	+	Мостовая Послед-но парал-я	4
2 x ТМРП 6300	3300	3200	10,5	11,6	0,997	0,92	12,6	1,096	0,936	59,2	26	0	Кольцевая параллельная	3

Проведенный сравнительный расчет мощности потерь в вентильных конструкциях в исследуемых схемотехнических решениях показывает, что эффект снижения потерь мощности увеличивается при возрастании нагрузки на ТВА к максимальным значениям отмечается в кольцевых вентильных структурах. Это указывает на эффективность кольцевых схем выпрямления в ТВА ТП с большим коэффициентом загрузки, что характерно для грузонапряженных участков ЖД транспорта.

Таким образом, сравнение основных характеристик полученных в результате модернизации трансформаторного и вентильного оборудования предлагаемого схемотехнического решения 2хТМРП-12600/10 (база двух УТМРУ-6300/35ЖУ1) и 24-х пульсового ТВА на базе трансформатора ТМРУ-16000/10 в (таблице 4.7) показывает преимущество модульного выпрямителя с параллельным соединением ТВМ с точки зрения снижения потерь электроэнергии.

Существует еще один путь минимизации потерь электроэнергии на ТВА ТП который представляет особенность конструкции предлагаемого модульного 24-х пульсового выпрямителя с параллельным соединением ТВМ, что позволяет использовать два преобразовательных трансформатора пониженной мощности. Используемые на тяговых подстанциях преобразовательные трансформаторы с масляным охлаждением являются опасными поэтому требуют постоянного контроля и обслуживания. Но также промышленностью выпускают преобразовательные трансформаторы сухого исполнения с аналогичными характеристиками, которые более безопасны и обладают меньшими потерями электроэнергии (таблица 4.8).

Таблица 4.8 – Сопоставление стоимости применения на тяговых подстанциях трансформатора ТРДП-6300/10Ж1 УХЛ1 трансформатора ТРСЗПА-6300/10Ж1 УХЛ2, о.е.

№ п\п	Наименование затрат	ТРДП-6300/10	ТРСЗПА-6300/10
1	2	3	4
Капитальные затраты, о.е.			
1.	Приобретение трансформатора	0,74	0,92
2.	Сушка и замена масла	0,032	–
3.	Устройство маслосборной ямы и маслоотводной трубы к резервуару	0,084	–
	Итого:	0,856	0,92
Эксплуатационные расходы, о.е.			
1.	Амортизация (5,2%)	0,045	0,0483
2.	Дополнительные затраты на обслуживание «масляного» трансформатора	0,032	–
3.	Потери электроэнергии	0,454	0,327
	Итого:	0,531	0,3753



Потери электрической энергии рассчитывались при коэффициенте использования установленной мощности 0,56. Потери холостого хода и короткого замыкания для «масляных» преобразовательных трансформаторов мощностью 6300/10 приняты по последним данным АО УЭТМ соответственно, 8420 Вт 44930 Вт, что согласуется с потерями мощности трансформаторов более ранних выпусков УТМРУ-6300; ТМП-6300 и др. Поэтому замена двух модернизированных УТМРУ-6300/10 на два сухих преобразовательных трансформатора ТРСЗА-6300/10 позволит снизить потери электроэнергии порядка 27 %.

#### **4.2 Определение экономической эффективности переоборудования двенадцати пульсовых выпрямительных агрегатов тяговых подстанций на модульные двадцатичетырех пульсовые трансформаторно-выпрямительные агрегаты кольцевого типа**

Важным технико-экономическим показателем ТВА является значения годовой экономия средств ( $C$ ) связанные с повышением коэффициента мощности при переоборудовании схем с числом пульсаций  $m_q$  к схемотехническим решениям числом пульсаций –  $m_q'$ . Вычисляем экономию средств в соответствии с [18] :

$$C = b \cdot k_{\varepsilon} \cdot k_3 \cdot A_{НОМ} \cdot 365 [\operatorname{tg}(\arccos \chi_{mq}) - \operatorname{tg}(\arccos \chi'_{mq})], \quad (4.1)$$

где  $b$  – стоимость электроэнергии, руб. / кВт·ч;

$k_{\varepsilon} = 0,08$  – коэффициент экономической эквивалентности реактивной мощности [58], кВт / кварт;

$$k_3 = A_C / A_{НОМ} \approx I_d / I_{дном};$$

$A_C$  – переработка электроэнергии (суточная) электропоездами выпрямленного тока, кВт·ч;

$A_{НОМ}$  – номинальная переработка электроэнергии электропоездами в течении суток, обозначенная в расчётах 10 МВт × 24 ч;

$\chi_{mq}$   $\chi'_{mq}$  – коэффициенты мощности сравниваемых выпрямителей при определенных значениях коэффициентов загрузки.

Экономия электроэнергии (суточная) рассчитывается по следующей приведенной формуле:

$$C_c = b \cdot k_{\varphi} A_C \cdot [tg(\arccos \chi_{mq}) - tg(\arccos \chi'_{mq})]. \quad (4.2)$$

Увеличение пульсаций выпрямленного напряжения приводит к значительному усложнению технологии изготовления ВО и увеличивает затраты при изготовлении выпрямителя, поэтому возникает необходимость точной оценки экономии средств при эксплуатации ТВА, реализованных по новым схемным решениям. На основании данных таблицы 3.2 из [18] и решений по формулам (4.1) и (4.2) которые обобщены в таблице 4.9 показывающие результаты экономии электроэнергии (суточной) и экономии средств (годовой) вызванные повышением коэффициента мощности  $\chi_{mq}$  при переходе на ТВА с большим количеством пульсаций.

Из анализа значений (таблиц 4.5 и 4.9) а также графика 4.7 следует вывод, что снижение потерь электрической энергии в ТВА, вызванное увеличением значения коэффициента мощности и снижением потерь мощности в вентильных схемах можно реализовать при внедрении 24-х пульсового модульного ТВА с параллельным соединением ТВМ.

В модульном ТВА с параллельным соединением ТВМ помимо повышения коэффициента мощности и снижения потерь мощности в вентильных схемах, немаловажным является то, что исключаются потери на уравнительном реакторе, снижается типовая мощность трансформаторного оборудования. с увеличением пульсности выпрямленного напряжения повышается ее стабильность, снижается действующее значение сетевого тока при сохранении выпрямленного напряжения.

Экономический эффект  $C_{\varnothing}$  от технической модернизации вентильных конструкций одного выпрямителя за первый год эксплуатации можно рассчитать по следующей формуле [18]:

$$C_{\varnothing} = \Delta P_{B(-)} \cdot t_{ч год} \cdot Ц_{\varnothing} \cdot K_3,$$

где  $\Delta P_{B(-)}$  – разница потерь мощности в диодах, кВт ;

Таблица 4.9 – Показатели экономии электроэнергии и годовой экономии средств в зависимости от пульсности ТВА при различных нагрузках ТП постоянного тока

Суточная переработка, МВт·ч		48	96	144	192	240	
Коэфф-т загрузки, $K_3$		0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	
$tg(\arccos \chi_{mq})$ при $mq$		12	0,212	0,211	0,225	0,242	0,259
		24	0,154	0,145	0,154	0,167	0,179
ЭКОНОМИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ $mq$	Суточная электроэнергии, МВт·ч	12→24	0,241	0,541	0,873	1,245	1,658
	Годовая, средств, тыс. руб	12→24	115,89	260,19	420,45	599,69	798,87

$t_{ч год}$  – количество часов в году;

$C_э$  – стоимость электроэнергии, руб. / кВт·ч, принятая при расчётах равной 1 рубль 42 копейки;

$K_3$  – коэффициент загрузки ВА.

В таблице 4.10 приведены результаты расчётов годовой экономии денежных средств при замене 12-х пульсовых мостовых выпрямителей на модульный 24-х пульсовый ТВА с кольцевой вентильной конструкцией. Для сравнимости результатов анализа в расчетах были использованы в вентильных плечах диоды ДЛ133-500 в обоих ТВА.

Из таблицы видно, что замена ныне действующего 24-х пульсного ТВА с мостовой вентильной конструкцией последовательно-параллельного типа на тяговой подстанции «Омск» с диодами ДЛ133-500 на предлагаемый 24-х пульсовый модульный выпрямитель параллельного типа с кольцевой вентильной конструкцией с теми же диодами показывает о снижении мощности потерь в вентильных конструкциях.

Ситуация достаточно типична для 24-х пульсовых ТВА (они устанавливаются только на ТП грузонапряжённых участков) где коэффициент загрузки составляет  $K_3=0,4 - 0,5$ , помимо значительной экономии за счёт повышения коэффициента мощности, позволяет делать экономию средств на 304 тыс. руб. за один год о на одной вентильной схеме ТВА ТП.

Таблица 4.10 – Результаты расчёта годовой экономии электроэнергии в вентильных конструкциях при переоборудовании 12-ти на 24-х пульсовые ТВА

Выпрямительная схемы	Количество плеч $N_{П}$	Количество СПП в плече, S	Количество СПП в плече, a	Количество плеч в цепи тока, $N_{ПIS}$	Количество СПП последовательно в цепи тока, $n_s$	Потери мощности в вентилях схемных решений при значениях загрузки ТВА ( $K_3$ ), кВт			
						0,2	0,4	0,6	0,8
Мостовая	12	4	6	4	14	4,291	9,435	14,805	20,61
Кольцевая	24	4	6	3	13	3,58	7,53	11,85	16,53
Годовая экономия	электроэнергии при переходе на кольцевую структуру, тыс. кВт·ч					6,22	16,67	26,20	35,70
	средств при переходе на кольцевую структуры, тыс. руб.					8,83	23,67	37,20	50,69

Вместе с тем, очевидно, что применение 24-пульсового преобразователя, оснащённого кольцевой вентильной конструкцией, наиболее рационально на грузонапряжённых участках железных дорог. При достижении загруженности тяговой подстанции, соответствующей коэффициенту  $K_3=0,8$ , экономия денежных средств может достигнуть 0,5 миллиона рублей.

Большое значение при замене диодов в вентильных плечах на диоды более высоких классов имеет то, что в три раза уменьшается их общее количество. Это существенно снижает капитальные затраты при реконструкции вентильной схемы. Кроме того, повышается надёжность вентильной конструкции, а также упрощается процесс технического обслуживания во время эксплуатации.

Переход от мостовых схем выпрямления последовательно-параллельного типа с УР связан с потерями мощности в диодах вентильной конструкции и УР, к модульному ТВА с параллельным соединением идентичных ТВМ с кольцевыми вентильными конструкциями позволяет снизить эти потери и отказаться от УР [80].

По данным указанных в (таблицах 4.9 и 4.10) построен график, отображенный на рисунке 4.6.

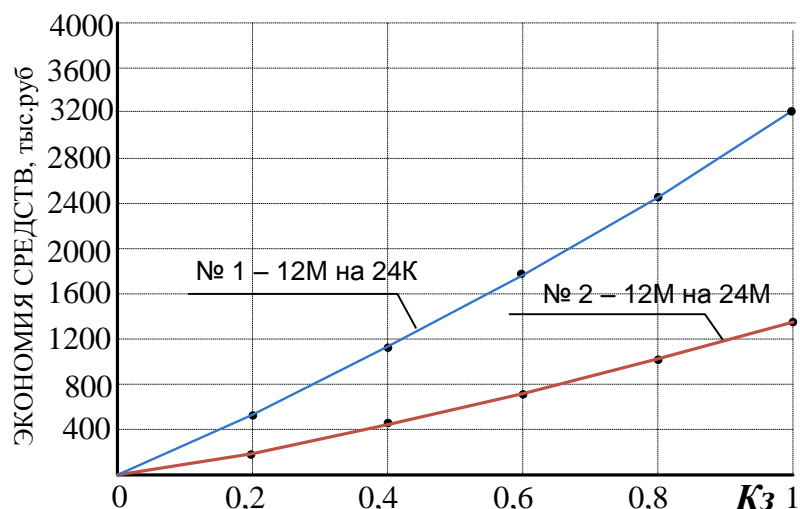


Рисунок 4.6 – Кривые годовой экономии денежных средств при переходе с 12-ти пульсовых мостовых выпрямителей на 24-х пульсовые ТВА

Где: № 1 – кривая замены 12-ти пульсового мостового выпрямителя на 24-х пульсовый ТВА с мостовой схемой последовательно-параллельного типа;

№ 2 – кривая замены 12-ти пульсового мостового выпрямителя на 24-х пульсовый модульный ТВА с параллельным соединением ТВМ с кольцевыми вентильными схемами.

Из рисунка видно, что при замене 12-ти пульсовых мостовых выпрямителей на действующий 24-х пульсовый ТВА с мостовой вентильной конструкцией последовательно-параллельного типа с диодами ДЛ133-500 не дает ощутимого экономического эффекта в сравнении с заменой с на предлагаемый 24-х пульсовый модульный выпрямитель с параллельным соединением ТВМ и кольцевыми вентильными конструкциями с теми же диодами.

Оценка годовой экономии электроэнергии при замене на ТП повышенной мощности Западно-Сибирской ЖД (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.

Таким образом предлагаемое схемотехническое решение 24-х пульсовое модульное ТВА с параллельным соединением ТВМ и кольцевыми вентильными конструкциями обладает лучшей энергетической и экономической эффективностью.

#### **Выводы по главе 4**

1. Разработан вариант модернизации двух известных ТВА пониженной мощности по новому 24-х пульсовому решению повышенной мощности, 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.

2. 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%.

3. Показано, что замена на ТП Западно-Сибирской ЖД 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.

## 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, которая на грузонапряженных участках ТП постоянного тока повышает их пропускную способность:

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 однострансформаторным 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 вентиляей.

5. Подтверждена достоверность результатов теоретических исследований модульных схемотехнических 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 ЖД 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 ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая стратегия ОАО «РЖД» на период до 2010 года и на перспективу до 2030 года. Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 11 февраля 2008 г. № 269р.
2. Гапанович В.А. Энергосбережение на железнодорожном транспорте: учебник для вузов / В.А. Гапанович, В.Д. Авилов, Б.А. Аржанников [ и др.]; под ред. В.А. Гапановича. – М.: Изд. Дом МИСиС, 2012. – 620 с.
3. Аржанников Б.А., Немытых Л.Н. Усиление системы электроснабжения постоянного тока // Транспорт Урала. – 2006. - №1 – С. 2-8.
4. Автоматическое бесконтактное регулирование напряжения на шинах тяговой подстанции постоянного тока / Р.Н.Урманов, Я.Л. Фишлер, М.И.Клейнерман, Б.А. Аржанников // Режимы регулирования напряжения в электрических сетях: Всесоюз. науч. конф. - Рига, 1968. - 20 с.
5. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. – М.: Транспорт, 2001. – 464 с.
6. Тяговое электроснабжение постоянного тока скоростного и тяжеловесного движения поездов: монография. Б.А. Аржанников. – Екатеринбург.: Изд-во УрГУПС, 2012. – 207 с.
7. Аржанников Б.А., Пышкин А.А. Совершенствование системы электроснабжения постоянного тока на основе автоматического регулирования напряжения тяговых подстанций. Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2006. 118 с.
8. Аржанников, Б.А. Выбор способа усиления устройств электроснабжения при введении тяжеловесного движения поездов [Текст] / Б.А. Аржанников, Л.Н. Немытых // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт, наука, бизнес: проблемы и стратегия развития», посв. 130-летию Свердлов. ж.д.: Сб. научн. тр. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2008. – С. 7 – 8.
9. Магай, Г.С. Использование многопульсовых выпрямителей тяговых подстанций постоянного тока с целью повышения пропускной способности участков и снижения затрат на электропотребление / Г.С. Магай, Т.В. Комякова,

- Е.Ю. Салита // Энерго- и ресурсосбережение в структурных подразделениях Западно – Сибирской железной дороги: материалы науч.- практ. конф. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2008.
10. Евдокимов, С.А. Анализ и синтез схемных решений вентильных преобразователей для электрического транспорта [Текст] / С.А. Евдокимов // Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2008. – 234 с.
11. Мятаж С.В. Трансформаторные преобразователи числа фаз с улучшенными энергетическими показателями: Дис. канд. техн. наук.- Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т, 2003. - 247 с.
12. Розанов Ю.К. Основы силовой электроники. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.
13. Преображенский, В.И. Полупроводниковые выпрямители [Текст] / В.И. Преображенский. – М.: Энергия, 1976. – 120 с.
14. Ворфоломеев, Г.Н. Многопульсные выпрямители для электрического транспорта [Текст] / Г.Н. Ворфоломеев, С.А. Евдокимов, О.Л. Волкова, О.С. Иванько, Е.А. Юркова // Сборник научных трудов НГТУ. – 2008. – № 1.(51) – С. 93–98.
15. Зиновьев Г.С., Ганин М. В. Системы тягового электроснабжения с улучшенной электромагнитной совместимостью // Совершенствование технических средств электрического транспорта: Сб. науч. тр.,- Новосибирск: НГТУ, 1999. С. 67-69.
16. Бадер, М. П. Энергетическая эффективность и электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения постоянного тока с напряжением в тяговой сети 24 кВ [Текст] / М. П. Бадер // Электротехника. –2011. – № 8. – С. 20–28.
17. Барковский, Б.С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций [Текст] / Б.С. Барковский, Г.С. Магай, В.П. Маценко и др.; под ред. М.Г. Шалимова. – М.: Транспорт, 1990. – 127 с.
18. Евдокимов, С.А. Структурный синтез многофазных вентильных преобразователей [Текст] / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров // Серия «Монографии НГТУ». – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – 423 с.

19. Евдокимов, С.А. Вариант классификации выпрямителей по топологическим признакам [Текст] / С.А. Евдокимов, Г.С. Зиновьев // Материалы IX Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: в 7 т.– Новосибирск: НГТУ, 2008. – Т. 7. – С 3 – 14.
20. Слепцов, М.А. Основы электрического транспорта [Текст]: учебник для студ. высш. учеб. заведений / М.А.Слепцов, Г.П. Долаберидзе, А.В. Прокопович и др.; под общ. ред. М.А. Слепцова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
21. Руденко, В.С. Основы преобразовательной техники [Текст]: учебник для вузов / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – М.: Высшая школа, 1980. – 424 с.
22. Бей, Ю.М. Тяговые подстанции [Текст]: учебник для вузов ж.-д. транспорта / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1986. – 319 с.
23. Сопов В.И. Электроснабжение и тяговые сети городского электрического транспорта. - Новосибирск: НЭТИ. 1981. – 121 с.
24. Соколов, С.Д. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций [Текст] / С.Д. Соколов, Ю.М. Бей, Я.Д. Гуральник и др. – М.: Транспорт. 1979. – 264 с.
25. Комякова Т.В. Многопульсовые выпрямители тяговых подстанций электрического транспорта: Дис. канд. техн. наук.- Омск: Омский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1999. - 281 с.
26. ГОСТ 18142.1-85 Выпрямители полупроводниковые мощностью свыше 5 кВт. Изд-во стандартов. 1985.
27. ГОСТ 6962-85. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Изд-во стандартов. 1985.
28. Загайнов Н.А. Тяговые подстанции городского электрического транспорта. - М: Транспорт. 1970. —350 с.
29. Быков Е. И. Электроснабжение метрополитенов. Устройство, эксплуатация, проектирование / Е. И. Быков. М.: Транспорт, 1997. 431 с.

30. Зиновьев, Г.С. Высоковольтный DC-DC конвертор для электровозов новой волны [Текст] / Г.С. Зиновьев, Н.Н. Лопаткин, Х. Вайс // Электротехника № 12, 2009. – С. 46 – 51.
31. ГОСТ 32144-2013 Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Электромагнитная совместимость. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Изд-во стандартов, 1913.
32. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость электрифицированных железных дорог: В 4 ч. – М.: МИИТ, 1999.
33. Хохлов Ю.И. Применение компенсированных выпрямителей для питания тяговой нагрузки [Текст] / Ю.И. Хохлов // Электричество № 4, 2008 – С. 58
34. Фишлер, Я.Л. Трансформаторное оборудование для преобразовательных установок [Текст] / Я.Л. Фишлер, Р.Н. Урманов, Л.М. Пестряева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 320 с.
35. Шляпошников Б.М. Игнитронные выпрямители. – М.: Трансжелдориздат. 1947. – 735 с.
36. 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
37. Аржанников Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока // Ж.-д. трансп. Сер. Электроснабжение железных дорог: ЭИ / ЦНИИТЭИ МПС. -1990. - Вып.4. – С.17-27.
38. Сопов В.И. Техничко-экономическое обоснование номинальных единичных мощностей и количества выпрямительных агрегатов на тяговых подстанциях электрических железных дорог: Дис. канд. техн. наук. - Омск, 1971. – 248 с.
39. Комякова Т.В. О шкале номинальных мощностей выпрямителей тяговых подстанций // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог: Межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омская гос. акад. путей сообщения. Омск, 1995. – С. 21 – 25.

40. Тихменев Б.Н., Горин Н.Н., Кучумов В.А. Электрическая тяга постоянного тока: возможности усиления // Железнодорожный транспорт. -1987. - №7. - С.48-50.
41. Урманов Р.Н., Ветлугин Е.М. К теории регулирования напряжения трансформатора дросселями насыщения. – Известия вузов, Электротехника, 1965, №2.
42. Засорин С.Н., Бабаева В.М. Регулируемый преобразователь на тиристорах для повышения напряжения в контактной сети железных дорог постоянного тока. Труды МИИТа, вып. 302. Транспорт, М. – 1969.
43. Вербицкий, В.А. Особенности электроснабжения в условиях тяжеловесного движения [Текст] / В.А. Вербицкий, И.А. Пятецкий // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Транспорт, наука, бизнес: проблемы и стратегия развития», посв. 130-летию Сверд. ж.д.: Сб. научн. тр. – Екатеринбург: УрГУПС. – 2008. – 290 с., С 17 – 18.
44. Репин, А.М. Новые базовые технические решения и классификация вентильных преобразователей энергии [Текст] / А.М. Репин // Вопросы радиоэлектроники. Серия ОВР, 1985. – Вып.6. – С. 65 – 83.
45. А. с. 1638779 СССР. Преобразователь переменного тока в постоянный / Б.С. Барковский, Г.С. Магай и др. – Бюл. № 12, 1989.
46. Зиновьев, Г.С. Основы силовой электроники: Учебник [Текст] / Г.С. Зиновьев. – Новосибирск: НГТУ, 2009. – 672 с.
47. Маценко, В.П. Качество электрической энергии при использовании многопульсовых выпрямителей [Текст]: / В.П. Маценко, Т.В. Комякова, Т.В. Ковалева // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1991. – С. 14–18.
48. Ворфоломеев Г .Н. Методы и средства преобразования числа фаз для улучшения электромагнитной совместимости в электрических системах: Дис. докт. техн. наук, - Новосибирск: НГТУ. 1998.-247 с.

- 49.Маценко, В.П. Качество электрической энергии при использовании многопульсовых выпрямителей [Текст]: / В.П. Маценко, Т.В. Комякова, Т.В. Ковалева // Улучшение качества и снижение потерь электрической энергии в системах электроснабжения железных дорог: межвуз. темат. сб. науч. тр. / Омский ин-т инж. ж.-д. трансп. – Омск, 1991. – С. 14–18.
- 50.Преобразователи с улучшенными технико-экономическими показателями для тяговых подстанций электрических железных дорог постоянного тока / Шалимов М.Г., Магай Г.С., Комякова Т.В. др. // Проблемы ж.-д. трансп. Сибири: Материалы научно техн. конф. посвященной 65 летию Сибирской гос. Академии путей сообщения. - Новосибирск: СГАПС. 1997. -С.297.
- 51.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.
- 52.Мятеж, С.В. Методика определения установленных мощностей трансформаторных преобразователей числа фаз [Текст] / С.В. Мятеж, Г.Н. Ворфоломеев, Н.И. Щуров, И.А. Циулина, С.А. Евдокимов // Совершенствование технических средств электрического транспорта: сб. науч. тр. / Новосибирский государственный технический университет. – Новосибирск, 2002. – С. 21–28.
- 53.Степанов А.А. К методам расчета установленных мощностей выпрямительных трансформаторов [Текст] / О.Л. Волкова, Н.И. Щуров, А.А. Степанов // Научный вестник НГТУ. – 2010. – №4 (41). – С. 155 – 160.
- 54.. Stepanov, A.A., 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.
- 55.Евдокимов, С.А. Точки Штейнера в топологии трехфазных систем напряжения [Текст] / С.А. Евдокимов // Науч. вест. НГТУ. – 2011. – № 5 (42). – С. 93 – 107.

56. Виноградов А.В. Расчет потерь в обмотках трансформатора, работающего в 24-фазной эквивалентной схеме выпрямления // Исследование систем и устройств автоматического регулирования напряжения в контактной сети: Межвуз. сб. науч. тр. / Свердловск: Уральский эл.–мех. ин-т инж. трансп., 1982. – С. 81 – 92.
57. Шляпошников Б.М., Поссе А.В. Работа ионных преобразователей при несинусоидальном напряжении переменного тока // Электричество. – 1952. - № 3. – С. 8-17.
58. Степанов А.А. 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 НГAVT, 2010. – №1. – С.323–325
59. А.с. 817923 СССР. Преобразователь переменного тока в постоянный / А.Г. Аслан-заде. Бюл. № 12, 1981.
60. Абдулаев, А.А. Анализ многопульсного выпрямления [Текст] / А.А. Абдулаев, А.Г. Аслан-заде // Электричество. – 1977. – № 8. – С. 57 – 63.
61. Пат РФ № 2340072. Преобразователь переменного напряжения в постоянное / С.А. Евдокимов. Бюл. № 33, 2008.
62. Пат РФ № 2373628. Преобразователь переменного напряжения в постоянное / С.А. Евдокимов. Бюл. № 32, 2009.
63. Степанов А.А. Энергоэффективность двадцатичетырехпульсового выпрямителя в системе распределенного электроснабжения постоянного тока при использовании кольцевых схем выпрямления [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука технологии инновации»: в 7-и частях. Часть. 5. – Новосибирск: НГТУ, 2013 – С. 380–383.
64. Пат. РФ №142753. Двдцатичетырехпульсный преобразователь переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, О.Л. Волкова, С.В. Мятаж, В.И. Сопов, М.М. Джаборов. – Бюл. №19, 2014.

65. Степанов А.А. Двадцатичетырехпульсный выпрямитель в системе распределенного электроснабжения постоянного тока с улучшенной электромагнитной совместимостью [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. Щуров, // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука технологии инновации»: в 7-и частях. Часть. 5. – Новосибирск: НГТУ, 2012 – С. 380–383.
66. Степанов А.А. Выпрямители для систем распределенного электроснабжения железных дорог постоянным током / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, С.В. Мятаж, М.М. Джаборов, А.А. Степанов // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. №2 (68). - С. 117 – 124.
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. Евдокимов С.А. Графоаналитический метод оценки влияния конструктивной несимметрии обмоток на форму кривой выпрямленного напряжения / С.А.Евдокимов, В.В. Бирюков, Г.Н. Ворфоломеев // Электричество. 2007. - № 8. – С. 24 - 28.
71. Максимович, Н.Г. Методы топологического анализа электрических цепей [Текст] / Н.Г. Максимович. – Львов: Вища шк., 1970. – 256 с.
72. Толстов, Г.П. Ряды Фурье. Государственное издательство физико-математической литературы. – М.: - 1960.
73. Зевеке, Г. В., Ионкин, П.А.. Основы теории цепей. Издательство: Энергия. – 1975., - 752 с.



74. Шехтман, М.Г. Режимы работы и внешние характеристики двенадцатифазной каскадно-мостовой схемы преобразования [Текст] / М.Г. Шехтман // Известия НИИПТ вып. 5, 1960г. – С. 23 – 63.
75. Поссе, А.В. Схемы и режимы электропередач постоянного тока [Текст] / А.В. Поссе. – «Энергия» Ленинградское отделение, 1973г. – 305 с.
76. Яценко А.А. Применение схемы «скользящего треугольника» в многофазных преобразователях // Электричество. – 1982. - № 7.- С. 17-24.
77. Степанов А.А. 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.
78. Евдокимов, С.А., Лестничные и кольцевые вентильные схемы для преобразователей повышенной мощности [Текст] / С.А. Евдокимов, О.Л. Волкова // Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: в 7 т. Т. 7. – Новосибирск: НГТУ, 2010. – С. 51 – 58.
79. Степанов А.А. 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 НГАСУ, 2010. – № 1. – С. 329 – 333.
80. Пат. РФ №175986. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. В.И. Сопов, С.В. Мятаж, Д.М. Стрельникова, Е.Г. Лангеман, А.В. Кулекина. – Бюл. № 36, 2017.
81. Пат. РФ №176682. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. В.И. Сопов, С.В. Мятаж, Д.М. Стрельникова, Е.Г. Лангеман, А.В. Кулекина. – Бюл. № 3, 2018.

82. Степанов А.А. 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.
83. Степанов А.А. Перспективные лестничные и кольцевые выпрямители для тяговых подстанций железнодорожного транспорта [Текст] / С.А. Евдокимов, О.Л. Волкова, А.А. Степанов // Инновационная энергетика 2010: Материалы II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (10–12 ноября 2010 г.) – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010. – С.277–280.
84. Евдокимов, С.А. Лестничный выпрямитель для тяговой подстанции [Текст] / С.А. Евдокимов // «Транспорт: наука, техника, управление». Научный информационный сборник– М.: Изд-во ВИНТИ РАН, № 8, 2010. – С. 55 – 59.
85. Здрок, А.Г. Выпрямительные устройства [Текст] / А.Г. Здрок. – М.: Энергоатомиздат. 1988. – 144 с.
86. Тяговые подстанции / Ю.М. Бей, Р.Р. Мамошин, В.Н. Пупынин, М.Г. Шалимов. – М.: Транспорт, 1986. - 319 с.
87. Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и системы. - М.: Высшая школа, 1967. - 527 с.
88. Вологдин, В.П. Выпрямители [Текст] / В.П. Вологдин. – М.: ОНТИ. 1936. – 448 с.
89. Архангельский, Н.Л. Характеристики полупроводниковых преобразователей [Текст] / Н.Л. Архангельский, Б.С. Курнышев. – Иваново, 2000. – 72 с.
90. Бородин, Б.А. Мощные полупроводниковые приборы: Диоды: Справочник [Текст] / Б.А. Бородин, Б.В. Кондратьев, В.М. Ломакин и др.: Под ред. А.В. Голомедова. М.: Радио и связь, 1985. – 400 с.
91. Касьянов, А.Н. Micro-Cap в схемотехнике: учеб. пособие [Текст] / А.Н. Касьянов. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2004. – 112с.
92. Степанов А.А. Оптимизация структуры тридцатипульсного преобразователя. [Текст] / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, О.Л. Волкова, А.А. Степанов // Науч. вест. НГТУ. – 2012. № 3(48) – С. 125 – 129.

93. 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.
94. 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.
95. Колев, Св.Н. Външна характеристика и режими на работа на 12-фазен вентилен преобразувател с намалени загуби [Текст] / Св.Н. Колчев, А.К. Калчев // Научни трудове на ВИММЕСС: Сер.6 Електрификация и автоматизация на производствените процеси, 19 – Т.17. под ред.: Велев Д. и др. / Научн. тр. Висш. ин-т машиностр., механиз. и електрифик. селск. стоп. – Русе, (болг), 1974. – С. 117 – 120.
96. Силовое оборудование тяговых подстанций железной дороги (сб. справ. материалов) / ОАО «Российские железные дороги», филиал «Проектно-конструкторское бюро по электрификации железных дорог». – М.: Трансиздат, 2004. – 384 с.
97. Евдокимов С.А., Ворфоломеев Г.Н., Щуров Н.И. и др. Снижение параметрической несимметрии вентильных обмоток трансформатора 12-пульсного выпрямителя для электрического транспорта // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока: Научный журнал. – Новосибирск: Изд-во НГАВТ, 2004. – № 2. – С. 231 - 235.
98. Рощупкин Б.П., Магай Г.С., Салита Е.Ю. Двенадцатипульсовые выпрямительные агрегаты на тяговых подстанциях городского электрического транспорта. – Омск: Омский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1986. – 8 с.
99. Барковский Б.С., Маценко В.П., Пономарев А.Г. Коэффициент полезного действия тяговых подстанций постоянного тока с различными выпрямителями // Повышение качества электрической энергии на тяговых подстанциях: Межвуз. темат. сб. научн. тр. – Омск: Омский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1979. – С. 28-33.

100. Ивановский Р.И. Компьютерные технологии в науке и образовании. Практика применения систем MathCAD Pro: Учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 2003. – 431 с.
101. Маликова Л.В., Пылькин А.Н. Практический курс по электронным таблицам MS Excel: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 244 с.
102. Пат. РФ №176682. Преобразователь с 24-кратной частотой пульсации переменного напряжения в постоянное [Текст] / А.А. Степанов, Н.И. В.И. Сопов, С.В. Мятаж, Д.М. Стрельникова, Е.Г. Лангеман, А.В. Кулекина. – Бюл. № 3, 2018.
103. ГОСТ 21128-95. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Изд-во стандартов. 1995.
104. ГОСТ 16110-82 Трансформаторы Силовые. Термины и определения. [Текст] – М.: Изд-во стандартов. 1992.
105. ГОСТ 16772-77 Трансформаторы и реакторы преобразовательные. Общие технические условия. Изд-во стандартов. 1978.
106. ГОСТ 18142-80 Преобразователи электроэнергии статические полупроводниковые переменного тока в постоянный (выпрямители). Общие технические условия. Изд-во стандартов. 1980.
107. Stepanov, A.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.
108. Степанов А.А. Энергоэффективность двенадцатипульсовой кольцевой схемы выпрямления [Текст] / А.А. Степанов // Материалы трудов XIX всероссийской научно-технической конференции «энергетика: эффективность, надежность, безопасность»: в двух томах. Т. 1. – Томск: Изд-во ООО «Скан», 2013 – С. 166 – 169.
109. Руденко, В.С. Расчет устройств преобразовательной техники [Текст] / В.С. Руденко, В.Я. Жуйков, И.Е. Коротеев. – К.: Техника, 1980. – 136 с.

110. Степанов А.А. Исследование зонного выпрямителя / С.А. Евдокимов, С.В. Мятаж, Е.В. Зотова, О.Л. Волкова, А.А. Степанов, В.Ю. Крышков // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. №1 (63). - С. 3 – 12.
111. Евдокимов С.А. Исследование зонного выпрямителя / С.А. Евдокимов, С.В. Мятаж, Е.В. Зотова, О.Л. Волкова, А.А. Степанов, В.Ю. Крышков // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. №1 (63). - С. 3 – 12.
112. Барковский Б.С., Шалимов М.Г. О выборе схемы включения выпрямителей на тяговых подстанциях // Повышение качества электрической энергии на тяговых подстанциях: Межвуз. темат. сб. научн. тр. – Омск: Омский ин-т инж. ж.-д. трансп., 1978. – С. 3-8.
113. Степанов А.А. 24-пульсовый преобразователь с последовательным соединением идентичных выпрямительных модулей [Текст] / А.А. Степанов, Б. В. Малозёмов // материалы XXII Международной научно-практической конференции «Российская наука в современном мире»: – Москва: Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2019. – С. 191–192.
114. Степанов А.А. Энергетическая эффективность 24-пульсового трансформаторно-выпрямительного агрегата с параллельным соединением идентичных преобразовательных модулей [Текст] / А.А. Степанов, Б. В. Малозёмов // материалы XXI Международной научно-практической конференции «EurasiaScience»: – Москва: Научно-издательский центр «Актуальность.РФ», 2019. – С. 110–111.
115. Волкова, О.Л. Методы синтеза структур выпрямителя [Текст] / О.Л. Волкова // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – №2 (64). – С. 117 – 122.
116. Волкова, О.Л. Методы синтеза структур выпрямителя [Текст] / О.Л. Волкова // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – №2 (64). – С. 117 – 122.

117. Васильев, Ю.П. Способ реконструкции тяговых подстанций постоянного тока 3,3 кВ для системы повышенного напряжения 12 кВ [Текст] / Ю.П. Васильев, А.Н. Марикин, В.М. Федоров // «Современные проблемы электрификации железных дорог России». Сборник научных трудов. Под ред. д-ра техн. наук А.Т. Буркова. – СПб.: Изд-во ПГУПС. 1998 . С. 103 – 105.
118. Ривкин Г.А. Преобразовательные установки большой мощности. – М.-Л.: Государственное энергетическое издательство, 1951. – 256 с.
119. Степанов А.А. Токораспределение в тяговых сетях при различных напряжениях источников питания [Текст] / Д.М. Стрельникова, В.И. Сопов, О.С. Мармулева, Е.А. Сухарева, А.А.Степанов // сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные исследования»: – Новосибирск: НГТУ, 2016. – С. 161–163.
120. Степанов А.А. Токораспределение в тяговых сетях с секциями двустороннего питания [Текст] / Д.М. Стрельникова, В.И. Сопов, А.А.Степанов // материалы II Всероссийской конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования»: – Новосибирск: НГТУ, 2016. – С. 127–130.

# ПРИЛОЖЕНИЕ А АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ



## Акт

об использовании в учебном процессе результатов диссертационного исследования на соискание ученой степени кандидата технических наук  
Степанова Александра Андреевича

Комиссия в составе:

- председатель – Вильбергер М.Е., к.т.н., доцент, декан ФМА;
- члены комиссии: – Бирюков В.В., к.т.н., доцент, председатель методической комиссии
- Мятеж С.В., к.т.н., доцент, кафедры ЭТК

Составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Степанова А.А. «Повышение энергоэффективности тяговых подстанций постоянного тока на основе многофазных трансформаторно-выпрямительных агрегатов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в учебном процессе на факультете механотроники и автоматизации Новосибирского государственного технического университета при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» и бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» специализация «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». На кафедре «Электротехнические комплексы» результаты работы используются в материалах лекций и при проведении лабораторных работ по дисциплине «Электроснабжение электрического транспорта», при проведении курсовых и выпускных квалификационных работ, а также в научно-исследовательской работе студентов.

Для сопровождения учебного процесса используются созданные при непосредственном участии автора расчетные и математические модели, результаты теоретических и экспериментальных исследований, имитационного моделирования, численные расчеты и их интерпретация, также созданная физическая модель.

Председатель комиссии

к.т.н., доцент Вильбергер М.Е.

Члены комиссии

к.т.н., доцент Бирюков В.В.

к.т.н., доцент Мятеж С.В.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б АКТ ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАУЧНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВЕ



ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»  
ТРАНСЭНЕРГО

**ЗАПАДНО-СИБИРСКАЯ ДИРЕКЦИЯ  
ПО ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЮ**

**ИНСКАЯ ДИСТАНЦИЯ  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

г. Новосибирск, 630025, Баганская, 102,  
Тел.: Тел.: (383) 337-95-26,  
Факс: (383) 337-95-26  
E-mail: BondarenroSV@wsrf.ru

« 04 » июля 2019 г. № /ЭСиб ЭЧ-8

## АКТ

об использовании результатов научных исследований и разработок кандидатской  
диссертации

Настоящий акт подтверждает, что результаты диссертационного исследования Степанова Александра Андреевича, выполненные на базе ФБГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», использованы Инской дистанцией Западно-Сибирской дирекции по энергообеспечению филиала ОАО «РЖД» в производственном цикле модернизации трансформаторно-выпрямительных агрегатов (ТВА) тяговых подстанций (ТПС) постоянного тока.

Разработанные в диссертации положения и рекомендации позволили подготовить и реализовать рабочий технологический проект 24-х пульсового ТВА мощностью 12600 кВт основанного на параллельном соединении двух идентичных 12-ти пульсовых трансформаторно-выпрямительных модулей (ТВМ) с кольцевыми вентильными структурами, каждый мощностью 6300 кВт и фазовым сдвигом между ними 15 эл. градусов.

Данный проект реализован в результате модернизации и реконструкции двух 12-ти пульсовых ТВА мощностью 6300 кВт с мостовыми вентильными схемами на испытательном полигоне экспериментально-производственного цеха (мастерских).

В ходе успешно проведенных испытаний было установлено, что разработанное схемотехническое решение ТВА на основе идентичных модулей в сравнении с находящимся в эксплуатации (24-х пульсовым мостовым одностранформаторным ТВА мощностью 16000 кВт на ТПС г. Омска) обеспечило снижение типовой мощности трансформаторного оборудования на 11%, увеличение выпрямленного напряжения на выходе ТПС на 4 % при максимальном значении нагрузки и повышение КПД на 1,1%.

Результаты экспериментальных исследований показали, что модульное построение 24-х пульсового ТВА ТП позволяет повысить пропускную способность ТПС постоянного тока это целесообразно использовать на грузонапряженном кузбасском направлении Новосибирского района.

Главный инженер Инской дистанции  
электрообеспечения Западно-Сибирской  
дирекции по энергообеспечению  
филиала ОАО «РЖД», канд. техн. наук



Демиденко И.С.