

На правах рукописи



**Джаборов Мехрубон Махмадкулович**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЗОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗОВ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Новосибирск – 2014

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

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

**Официальные оппоненты:** **Сальников Василий Герасимович**  
доктор технических наук, профессор,  
Новосибирская академия водного транспорта,  
профессор кафедры электроэнергетические  
системы и электротехника

**Козляев Юрий Дмитриевич**  
кандидат технических наук, профессор  
Сибирский государственный университет  
телекоммуникаций и информатики, профессор  
кафедры радиотехнических устройств

**Ведущая организация:** Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Сибирский федеральный университет»  
г. Красноярск

Защита состоится « 25 » сентября 2014 года в «10<sup>00</sup>» часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте <http://www.nstu.ru>.

Автореферат разослан « 27 » июня 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор технических наук,  
профессор



Нейман Владимир Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность** темы диссертационного исследования. Доля потребления электроэнергии железной дорогой России достаточно велика, она ежегодно составляет около 5...7 % от общей выработки. Распоряжением президента ОАО «Российские железные дороги» 11 февраля 2008 г была утверждена Энергетическая стратегия железнодорожного транспорта на перспективу до 2030 года. Одним из основных вопросов стратегии является повышение эффективности перевозочного процесса, достижение энергетической эффективности железнодорожного транспорта в целом, в том числе и на тягу поездов.

Около 25 тыс. км железных дорог в России электрифицировано по системе однофазного переменного тока промышленной частоты и электрификация на переменном токе продолжается. Более 20 % электровозов на переменном токе оборудованы преобразователями с однофазным зонно-фазовым регулированием (ОЗФР) для обеспечения плавности регулирования скорости тяговыми двигателями (ТЭД). Преобразователи ОЗФР нашли широкое применение на электровозах переменного тока серий ВЛ80р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1 и др.

Основным недостатком электровозов с ОЗФР на сегодняшний день является сравнительно низкие значения энергетических показателей, особенно коэффициента мощности  $\chi$ , среднее значение которого не превышает 0,8.

Изучению проблемы повышения энергетических показателей и путей ее решения посвящены работы ученых и исследователей, среди которых значительный вклад внесен Тихменевым Б.Н., Лисицыным А.Л., Плаксом А.В., Покровским С.В., Ермоленко Д.В., Яновым В.П., Бадером М.П., Тулуповым В.Д., Литовченко В.В., Барановым Л. А., Бурковым А. Т., Мамошиным Р.Р., Техманом Н.Б., Зиновьевым Г.С., Щуровым Н.И., Евдокимовым С.А. и др.

Одним из наиболее эффективных путей повышения энергетической эффективности грузовых электровозов на переменном токе является совершенствование ОЗФР, которое не сопряжено с дополнительным расходом материалов и не требует существенной переделки используемого трансформаторного оборудования.

**Целью работы** является повышение энергетических показателей однофазных зонно-фазовых регуляторов в системе управления тяговыми электродвигателями электровозов на переменном токе.

### **Задачи исследования:**

1. Исследование и систематизация существующих схемных решений ОЗФР для управления ТЭД электровозов на переменном токе.
2. Определение способов повышения энергетических показателей ОЗФР с учетом особенностей коммутационных процессов.
3. Построение схемного решения и оценка эффективности усовершенствованного ОЗФР с применением методов структурного синтеза.
4. Проведение модельных и экспериментальных исследований ОЗФР для проверки достоверности теоретических положений и определения их энергетической эффективности.

### **Методы исследований.**

Для решения поставленных задач в диссертационной работе применялись теоретические и экспериментальные методы исследований. В основу теоретиче-

ских исследований положены методы теории электрических цепей, метод структурного синтеза, метод кусочно-линейного припасовывания и метод непосредственного интегрирования. Экспериментальные исследования проводились на имитационных моделях в среде MATLAB/ Simulink, а так же на физической модели.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты теоретических исследований и сравнение двух ОЗФР, вентилярные части которых образуют классическую мостовую и предлагаемую лестничную структуру.
2. Структурный и параметрический синтез ОЗФР с лестничным построением системы автоматического регулирования ТЭД электровоза на переменном токе.
3. Результаты, полученные на имитационной модели ОЗФР различных структур, позволяющие проводить исследования энергетических показателей электровоза во всех режимах работы.
4. Результаты экспериментальных исследований физических моделей ОЗФР.

**Достоверность полученных результатов:**

Подтверждена сопоставительными вычислительными экспериментами, проводившимися на базе специализированных компьютерных программ в среде MATLAB/Simulink, а также сопоставлением теоретических расчетов с результатами экспериментальных исследований на физической модели ОЗФР электровоза серии ВЛ85.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Предложен усовершенствованный вариант ОЗФР с лестничной структурой, исключающий образование двойных контуров коммутации, что способствует достижению наивысших энергетических показателей преобразователя.
2. Получены расчетные соотношения, определяющие коэффициент фазового сдвига основной гармоники напряжения относительно тока для всех зон регулирования ОЗФР.

**Практическая ценность результатов работы.**

1. Разработаны и предложены улучшенные схемные решения ОЗФР с лестничной структурой для управления ТЭД электровозов на переменном токе, которые могут быть применены без изменения существующих систем управления и не требующие существенной переделки силовой части полупроводникового преобразователя и трансформаторного оборудования. В случае использования четырехзонного преобразователя с лестничной структурой, оснащенного предлагаемой системой управления, удастся повысить значения коэффициента мощности в пределах 3...5 %, по сравнению с существующими ОЗФР.
2. Разработаны имитационные модели ОЗФР различных структур, которые позволяют исследовать режимы работы, оценивать и повышать их тягово-энергетические показатели, решая задачи энергосбережения.

**Апробация работы.**

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на: научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 29 – ноября, 2 – декабря 2012 г. НГТУ, (Новосибирск); XI международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» 2–4 октября 2012г. НГТУ, (Новосибирск);

XIV международной заочной научно-практической конференции. – М., Изд. «Международный центр науки и образования», 2013.

#### **Публикации.**

По материалам диссертации опубликовано 7 печатных работ, в том числе 2 – в изданиях, рецензируемых ВАК.

#### **Структура и объем работы.**

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка использованной литературы из 100 наименований. Работа изложена на 177 страницах машинописного текста, включает 83 рисунка и 14 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** раскрыта актуальность задачи повышения энергетических показателей электровозов переменного тока, и определены направления данного исследования. Сформулирована цель, задачи исследований и пути их решения.

**В первой главе** рассмотрены краткие теоретические сведения и принципы работы регуляторов выходного напряжения для управления ТЭД электровозов, в роли которых используются управляемые и неуправляемые преобразователи, показаны особенности способов регулирования выходного напряжения.

Выявлены достоинства и недостатки амплитудного и фазового способов управления ТЭД. Показано, что достоинством амплитудного управления является достаточно высокий КПД и коэффициент мощности, достигающий значений 0,9...0,95, а недостатком – неизбежная ступенчатость регулирования выходного напряжения, которая на ЭПС приводит к значительным толчкам тягового усилия и может способствовать буксованию колесных пар. Кроме того, наличие громоздких коммутационных аппаратов снижает общую надежность регуляторов, увеличивает объем профилактического обслуживания и приводит в конечном итоге к высоким эксплуатационным затратам.

Показано, что достоинством фазового управления является возможность плавного регулирования выходного напряжения при отсутствии колебаний пускового тока. Это позволяет исключить из силовых цепей громоздкие коммутационные аппараты, переключающие секции трансформатора. К недостаткам фазового регулирования относятся низкие значения коэффициента мощности при больших углах регулирования  $\alpha$  и повышенная пульсация выпрямленного тока.

Предложено схемное решение по устранению выявленных недостатков амплитудного и фазового регулирования и показана целесообразность применения так называемых зонных преобразователей, которые получены путем объединения достоинств, принципов регулирования и схемных решений амплитудных и фазовых регуляторов.

Представлены особенности регулирования уровня выпрямленного напряжения зонных преобразователей для управления ТЭД электровозов переменного тока. Проанализированы способы построения схемных решений зонных преобразователей, как наиболее совершенных регуляторов. Установлено, что на сегодняшний день из известных схемных решений наибольшее распространение получила схема *однофазного мостового четырехзонного* преобразователя или мостового

ОЗФР, по которой собрано до 20 % электровозов серий ВЛ80р, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1, 2ЭС5к, 3ЭС5к и др.

Электрическая схема ОЗФР с мостовой структурой состоит из трех секционированных мостов (рисунок 1) и трех секций вторичных обмоток трансформатора,

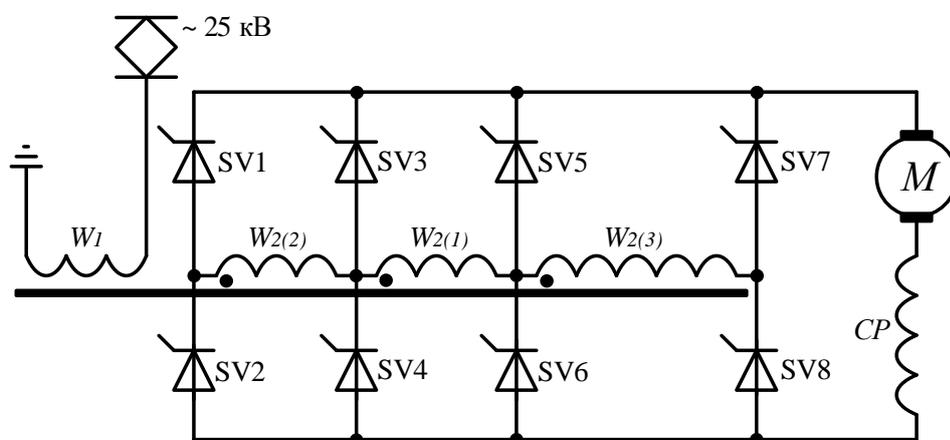


Рисунок 1 – Схема мостового ОЗФР на электровозах переменного тока

напряжения на которых соотносятся как 2:1:1. Такое соотношение дает четыре зоны регулирования напряжения на выходе преобразователя в диапазонах 0-1/4, 1/4-1/2, 1/2-3/4, 3/4-1 от номинального значения.

Вместе с тем, и в мостовом ОЗФР не исключен основной

недостаток – низкая величина коэффициента мощности, не превышающая в режиме тяги значений 0,7...0,8.

Поэтому в качестве объекта исследования был выбран указанный выше ОЗФР мостового исполнения для дальнейшего совершенствования схемного решения и повышения его энергетических показателей.

**Во второй главе** проведены исследования ОЗФР с мостовой структурой, а так же показаны характерные особенности коммутационных процессов для однозонных и многозонных режимов работы. Выявлены основные недостатки схемных решений и предложен способ их устранения.

Наиболее существенный «вклад» в снижение коэффициента мощности дает сдвиг по фазе между первыми гармониками тока и напряжения, вызванный образованием малых и больших контуров коммутации. При этом в классических ОЗФР малый контур является частью большого контура, что приводит к образованию двойного угла коммутации, как показано на рисунке 2.

Результаты проведенного анализа подтверждают, что вложения малых контуров в большие возникают во всех зонах регулирования, кроме первой. Это уменьшает рабочую часть периода регулирования преобразователя на 9...12°, снижает коэффициент мощности и вызывает дополнительные искажения выпрямленного напряжения.

Одним из эффективных путей решения задачи повышения коэффициента мощности электровозов на переменном токе с плавным ОЗФР напряжения является совершенствование силовой части преобразователя.

Основная задача такого совершенствования решается путем разнесения контуров коммутации таким образом, чтобы исключить их вложения. Это реализуется в схемах с так называемой лестничной структурой, разработанных на кафедре электротехнических комплексов НГТУ при участии автора.

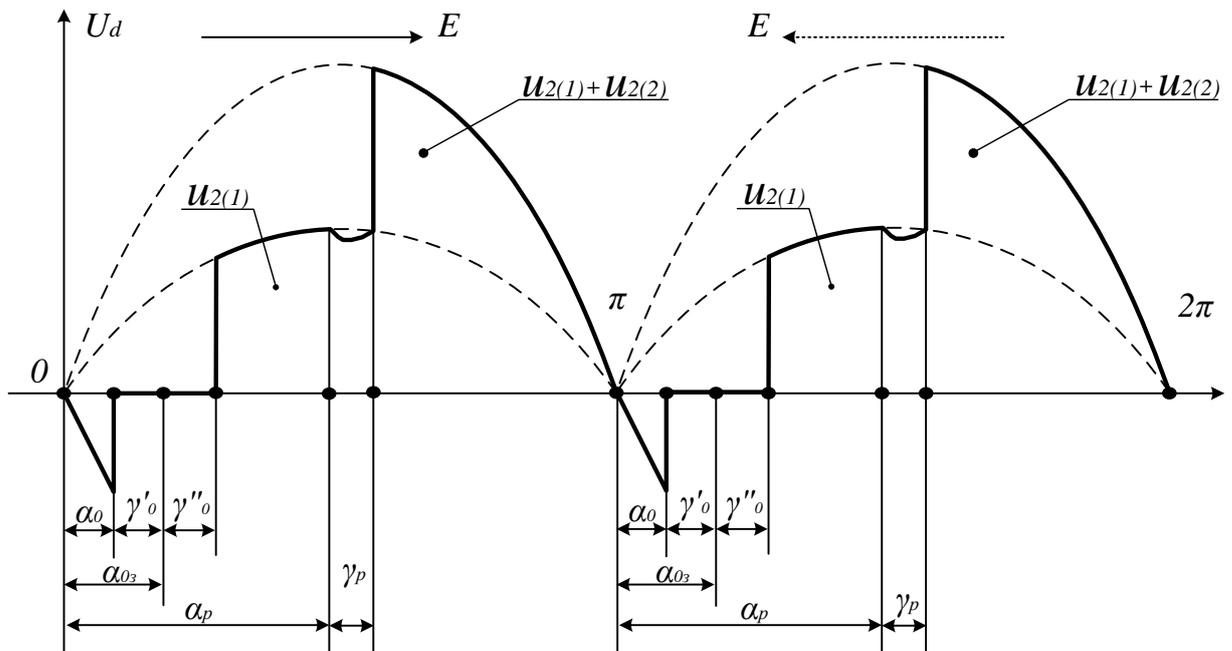


Рисунок 2 – Диаграмма выходного напряжения  $U_d$  во второй зоне регулирования мостового преобразователя

Лестничная структура ОЗФР позволяет выполнить схему четырехзонного преобразователя, не образующего двойного контура коммутации (рисунок 3,а). Достоинства приведенной лестничной структуры определяются симметричностью силовой части схемы и ее совместимостью с существующим оборудованием. В предложенной схеме вентильная часть ОЗФР электровозов серии ВЛ80Р упрощается, а трансформаторное оборудование подлежит несложной переделке. Помимо этого, становится более простым алгоритм управления тиристорами, который приведен на рисунке 3,б.

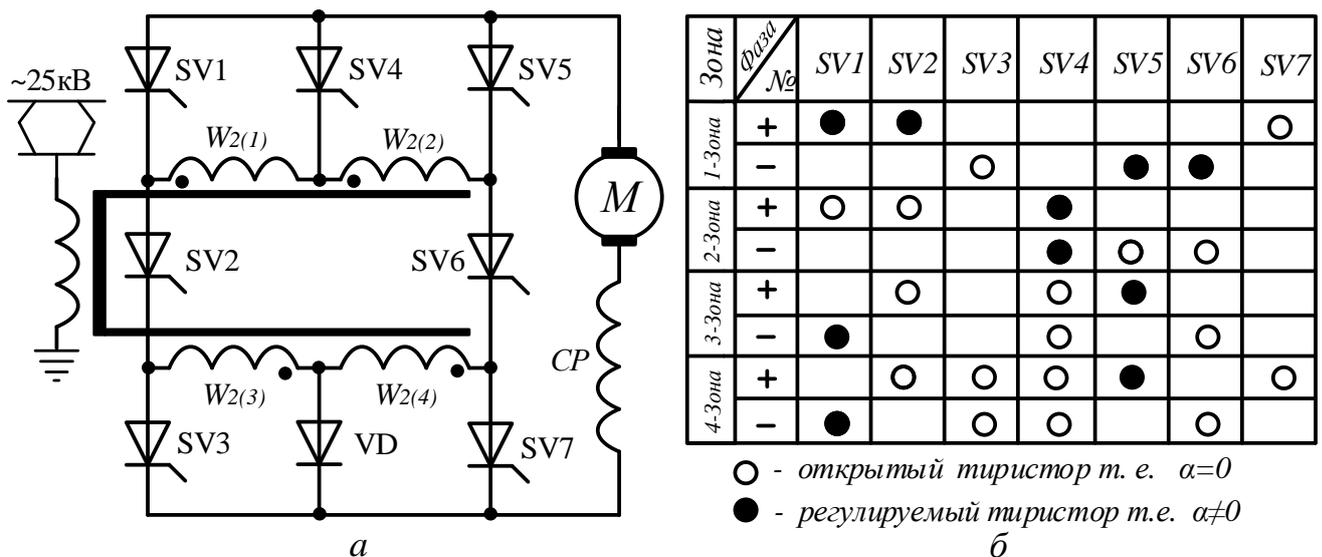


Рисунок 3 – Схема лестничного ОЗФР – а и алгоритм управления тиристорами – б

В ходе проведения экспериментальных исследований автором было установлено, что лестничному преобразователю присуща меньшая, по сравнению с пре-

образователем с мостовой структурой, продолжительность коммутационных процессов.

Однако при управлении мощной активно-индуктивной нагрузкой, которой являются тяговые двигатели, требуется предусматривать пути прохождения тока  $I_d$ , для чего следует использовать либо дополнительный обратный диод, либо сочетание тиристоров, приведенных в проводящее состояние (например,  $SV1+SV2+SV3$  или  $SV5+SV6+SV7$ ), поскольку индуктивный характер нагрузки препятствует естественному закрытию регулирующих тиристоров (рисунок 4).

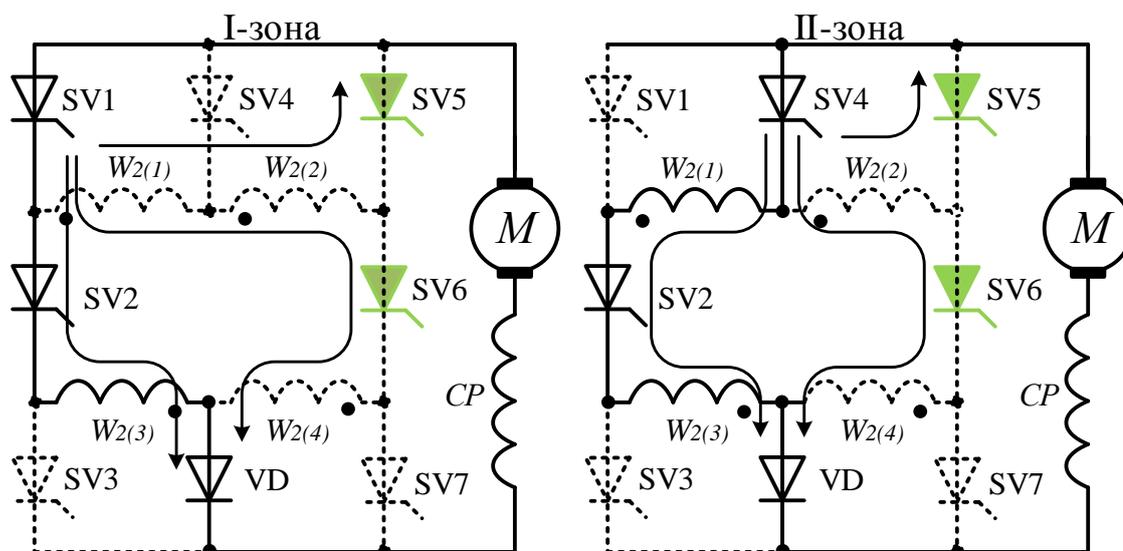


Рисунок 4 – Пути протекания токов по силовым цепям преобразователя с лестничной структурой

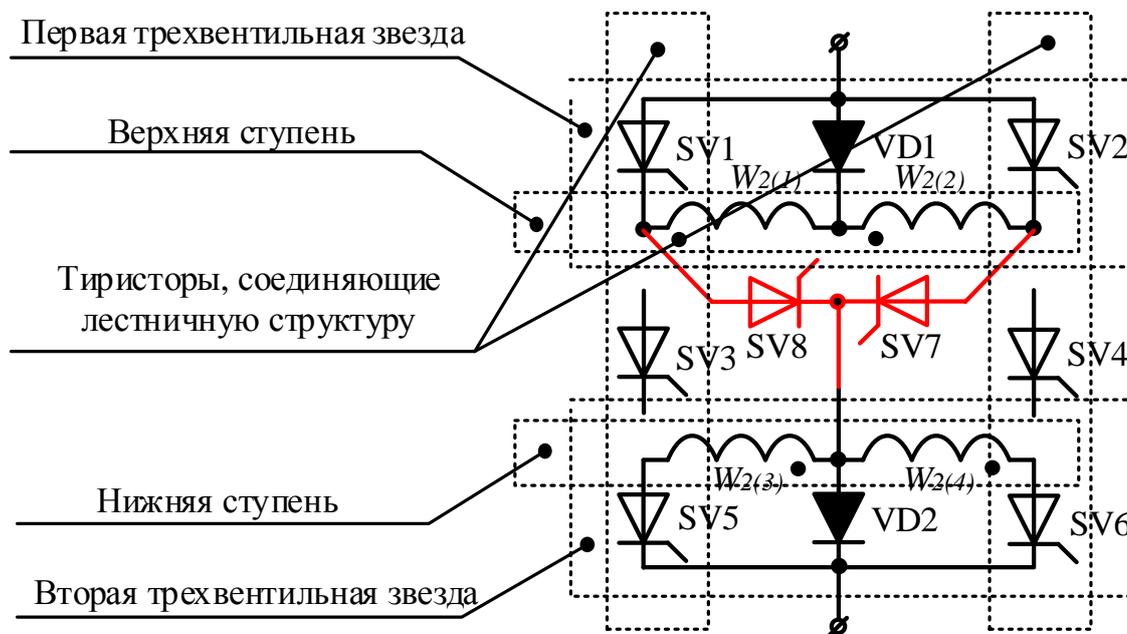


Рисунок 5 – Изменение топологии подключения тиристоров

Поэтому автором принято решение о дальнейшем совершенствовании схемного решения ОЗФР с лестничной структурой методом структурного синтеза

таким образом, чтобы предусмотреть естественные пути протекания тока для индуктивной нагрузки, не прибегая к дополнительным обратным диодам и не усложняя алгоритм управления тиристорами.

Задача совершенствования ОЗФР с лестничной структурой заключается в нахождении рациональных путей протекания тока при работе преобразователя на индуктивную нагрузку. Для этого схема была условно разделена на три участка – первую и вторую трехвентильные звезды и соединяющие их элементы, как показано на рисунке 5.

В результате исследований установлено, что в процессе регулирования ОЗФР в любой из трехвентильных звезд не следует открывать более одного тиристора, а центральные тиристоры целесообразно заменить на диоды  $VD1$ ,  $VD2$ .

Включение элементов, соединяющих участки ОЗФР с лестничной структурой, должно выполняться с учетом наличия открытых диодов в каждой трехвентильной звезде и насчитывает несколько вариантов. В ходе анализа полученных структур найден оптимальный вариант, который обеспечивает естественные пути протекания тока с индуктивным характером нагрузки в любой момент времени.

Итоговое предложенное схемное решение усовершенствованного ОЗФР с учетом разработанных алгоритмов управления тиристорами для всех зон регулирования показано на рисунке 6.

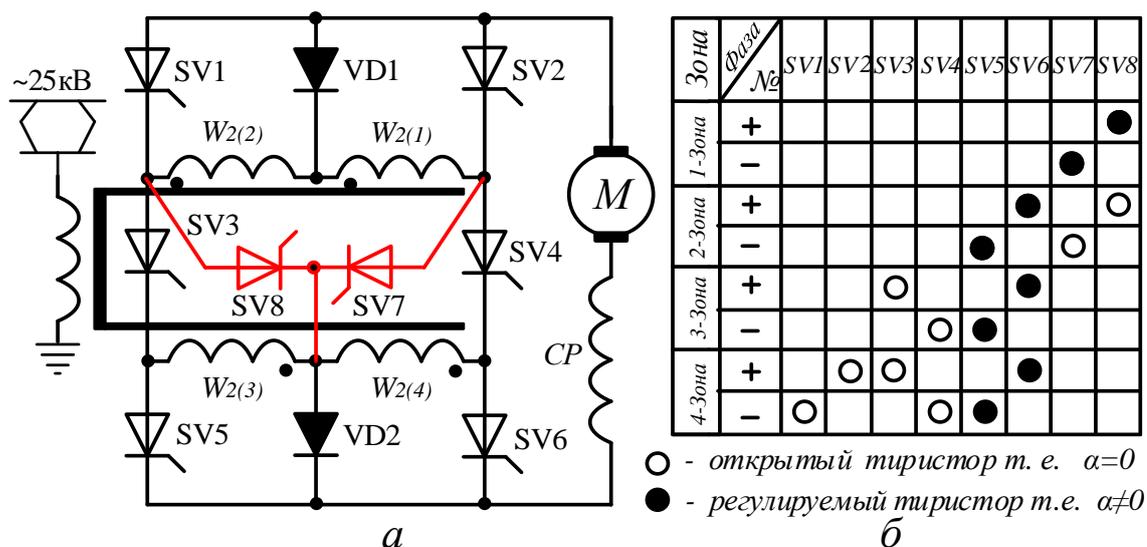


Рисунок 6 – Электрическая схема усовершенствованного ОЗФР с лестничной структурой – *а* и алгоритм управления тиристорами – *б*

**В третьей главе** работы выполнен анализ электромагнитных процессов для усовершенствованного ОЗФР с лестничной структурой.

Показано, что предлагаемый ОЗФР содержит естественные пути протекания тока при индуктивном характере нагрузки и обеспечивает разнесение контуров коммутации, благодаря чему исключается образование вложений одного контура коммутации в другой. В качестве примера на рисунке 7 приведены электрические схемы замещения ОЗФР для второй зоны регулирования, характеризующие особенности коммутационных процессов для разных временных интервалов.

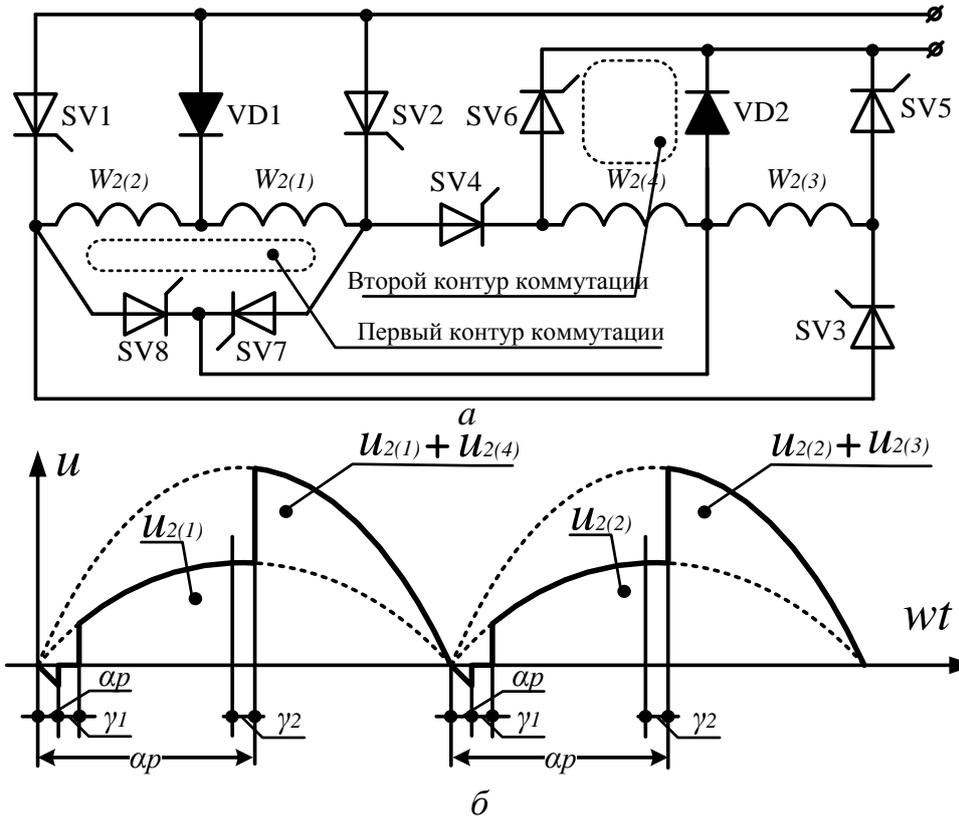


Рисунок 7 – Схема замещения усовершенствованного ОЗФР для второй зоны регулирования - *a* и диаграмма выходного напряжения  $U_d$ –*b*

Для всех зон регулирования проведен расчет коммутационных процессов и выведены уравнения для определения величин токов коммутации и длительности углов коммутации. Расчет выполнен по схемам замещения для каждой зоны регулирования. В качестве примера на рисунке 8 приведена расчетная схема для второй зоны регулирования.

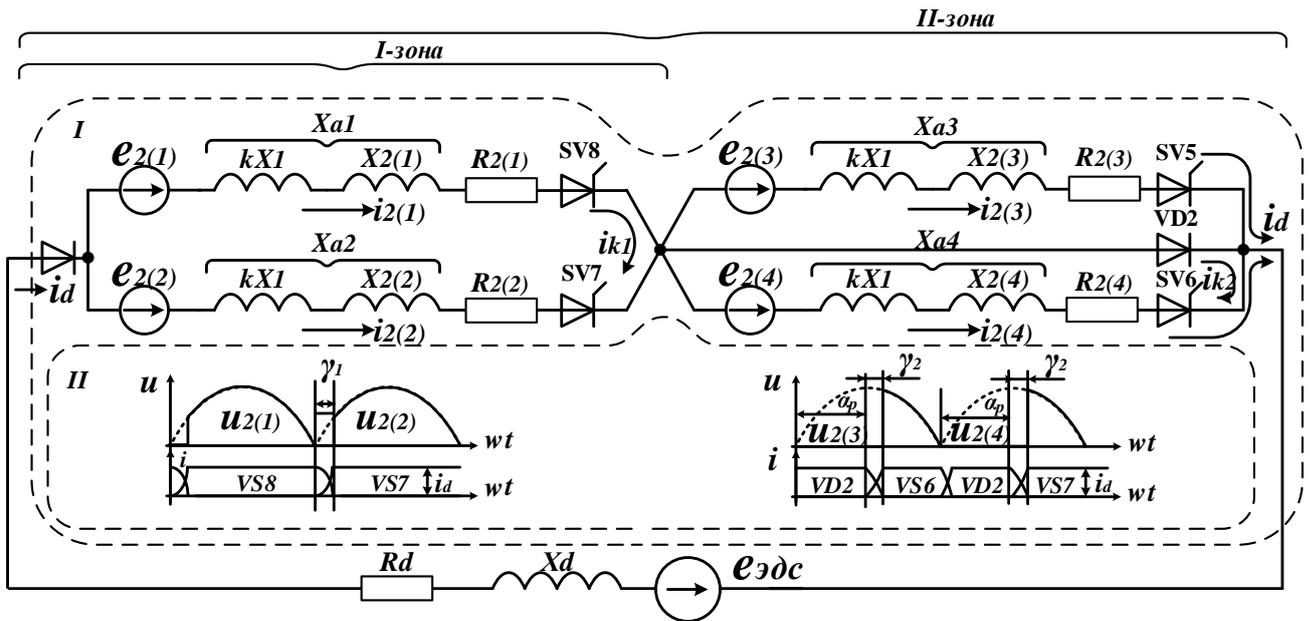


Рисунок 8 – Расчетная схема для второй зоны усовершенствованного четырехзонного преобразователя с лестничной структурой

Выведено уравнение, определяющие коэффициент фазового сдвига основной гармоники напряжения относительно тока для всех зон регулирования ОЗФР

$$\cos \phi_{1(1)} = \frac{P_{1(1)}}{S} = \frac{(\cos \frac{\alpha}{2} + 2n - 1)}{2n} \frac{\sum \Delta U_{d\gamma}}{U_{d0}}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол отпирания тиристоров;  $\sum \Delta U_{d\gamma}$  – суммарные коммутационные потери напряжения;  $n$  – номер зоны.

Таблица 1 – Основные расчетные соотношения усовершенствованного ОЗФР с лестничной структурой

Зоны	Напряжения	Токи	Мощность
I	$U_d = 0.9 \cdot E_2^{I(II)} \rightarrow E_2^{I(II)} = 1.11 \cdot U_d,$ $U_{a.max}^{I(II)} = \pi \cdot U_d$	$I_a^{I(II)} = 0.5 \cdot I_d,$ $I_2^{I(II)} = 0.707 \cdot I_d,$ $I_{a.max}^{I(II)} = I_d,$ $I_1 = I_d / k_{Tp}.$	$P_T = 1.34 \cdot P_d$
II	$U_d = 0.9 \cdot (E_2^{I(III)} + E_2^{II(IV)}),$ $U_{a.max}^{I,II,III,IV} = \pi \cdot U_d$	$I_a^{I,II,III,IV} = 0.5 \cdot I_d,$ $I_2^{I(II)} = 0.707 \cdot I_d,$ $I_2^{III(IV)} = I_d,$ $I_{a.max}^{I,II,III,IV} = I_d,$ $I_1 = I_d / k_{Tp}.$	$P_T = 1.34 \cdot P_d$
III	$U_d = 0.9 \cdot (E_2^I + E_2^{III} + E_2^{IV}),$ $U_{a.max}^{I(II)} = \pi \cdot U_d,$ $U_{a.max}^{III(IV)} = 0.5\pi \cdot U_d$	$I_a^{I,II,III,IV} = 0.5 \cdot I_d,$ $I_2^{I(II)} = 0.707 \cdot I_d,$ $I_2^{III(IV)} = I_d,$ $I_{a.max}^{I,II,III,IV} = I_d,$ $I_1 = I_d / k_{Tp}.$	$P_T = 1.225 \cdot P_d$
IV	$U_d = 0.9 \cdot (E_2^I + E_2^{II} + E_2^{III} + E_2^{IV}),$ $U_{a.max}^{I,II,III,IV} = 0.5\pi \cdot U_d$	$I_a^{I,II,III,IV} = 0.5 \cdot I_d,$ $I_2^{I,II,III,IV} = I_d,$ $I_{a.max}^{I,II,III,IV} = I_d,$ $I_1 = I_d / k_{Tp}.$	$P_T = 1.11 \cdot P_d$

Примечание: индексы I, II, III, IV соответствуют номерам вторичных обмоток трансформатора

В работе получены выражения для определения составляющих величин падений напряжений на элементах ОЗФР, которые сведены в таблицу 2.

Это позволило сопоставить средние значения выпрямленного напряжения на выходе ОЗФР с мостовой и лестничной структурой соединения тиристоров:

$$U_d = U_{d0\alpha} - U_{d0\gamma} - U_{d0R} - U_{d0V} \quad (2)$$

где,  $U_{d0\alpha}$  – среднее значение выпрямленного напряжения на холостом ходу с углом управления  $\alpha$ ;  $U_{d0\gamma}$ , – индуктивное падение напряжения вследствие коммутации;  $U_{d0R}$  – падение напряжения на активных сопротивлениях обмоток трансформатора;  $U_{d0V}$  – падение напряжения на силовых тиристорах (диодах).

Таблица 2 – Составляющие падений напряжений на элементах усовершенствованного ОЗФР с лестничной структурой

№ зоны	$u_{d0\alpha}$	$\Delta u_{d\gamma}$	$\Delta u_{dr}$	$\Delta u_{dv}$
I	$u_{d0} \cos \frac{\alpha}{2}$	$\frac{i_d x_d}{\pi} \xi$	$\frac{R_\phi i_d}{\pi} (\pi - \frac{\gamma_1}{2})$	$(u_{TO} + i_{FAT} r_T) s$
II	$u_{d0} (1 + \cos \frac{\alpha}{2})$	$\frac{i_d x_d}{\pi} \xi$	$\frac{R_\phi i_d}{\pi} (2\pi - \frac{\gamma_1}{2} - \frac{3\gamma_2}{2})$	$(u_{TO} + i_{FAT} r_T) s$
III	$u_{d0} (2 + \cos \frac{\alpha}{2})$	$\frac{3i_d x_d}{2\pi} \xi$	$\frac{R_\phi i_d}{\pi} (3\pi - \gamma_1 - \frac{5\gamma_2}{2} - \frac{\gamma_3}{2} - \frac{\gamma_1^2}{2\gamma_3})$	$(u_{TO} + i_{FAT} r_T) s$
IV	$u_{d0} (3 + \cos \frac{\alpha}{2})$	$\frac{2i_d x_d}{\pi} \xi$	$\frac{R_\phi i_d}{\pi} (4\pi - \frac{7\gamma_3}{2} - 2(\gamma_1 + \gamma_2) - \frac{\gamma_1^2}{\gamma_2})$	$2(u_{TO} + i_{FAT} r_T) s$

*Примечание:*  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  - углы коммутации, возникающие при переключении с одного полупериода синусоиды на другой,  $\gamma_3$  - угол коммутации, при переходе на очередную зону регулирования,  $u_{TO}$ ,  $r_T$  - параметры аппроксимированной ВАХ диода (тиристора),  $i_{FAT}$  - среднее значение тока диода (тиристора),  $s$  - количество последовательных тиристорov (диодов) в одном плече схемы выпрямителя,  $N_d$  - количество плеч выпрямителя, одновременно находящихся в контуре тока,  $\xi$  - поправочный коэффициент, учитывается влияние пульсации выпрямленного тока.

На основании полученных результатов установлено, что в ОЗФР мостового типа длительность периода коммутации только для первой зоны составляет 5...7 эл. град., а на последующих зонах – 10...12 эл. град. В ОЗФР лестничного типа для всех зон, кроме четвертой, длительность коммутации вследствие наличия только одного контура протекания тока составляет 5...7 эл. град.

Поэтому среднее значение коэффициента мощности ОЗФР лестничного типа всего лишь на 4...5 % ниже теоретического максимума ( $\approx 0,91$ ), в то время как у ОЗФР мостового типа это значение оказывается на 8...10 % ниже теоретического максимума, достигая только величины  $\approx 0,8$ , что хорошо известно из опыта эксплуатации.

На рисунке 9 приведены зависимости коэффициента фазового сдвига от угла отпирания тиристорov  $\alpha$  для каждой из четырех зон для ОЗФР с разными схемами исполнения.

Из приведенных зависимостей видно, что ОЗФР с лестничной структурой соединения тиристорov обладает более высокими энергетическими показателями,

поскольку на второй и третьей зоне он работает только с одним углом коммутации  $\gamma_1$  по сравнению с ОЗФР с мостовой структурой соединения тиристоров, у которого образуются двойные углы коммутации  $\gamma_1 + \gamma_2$ .

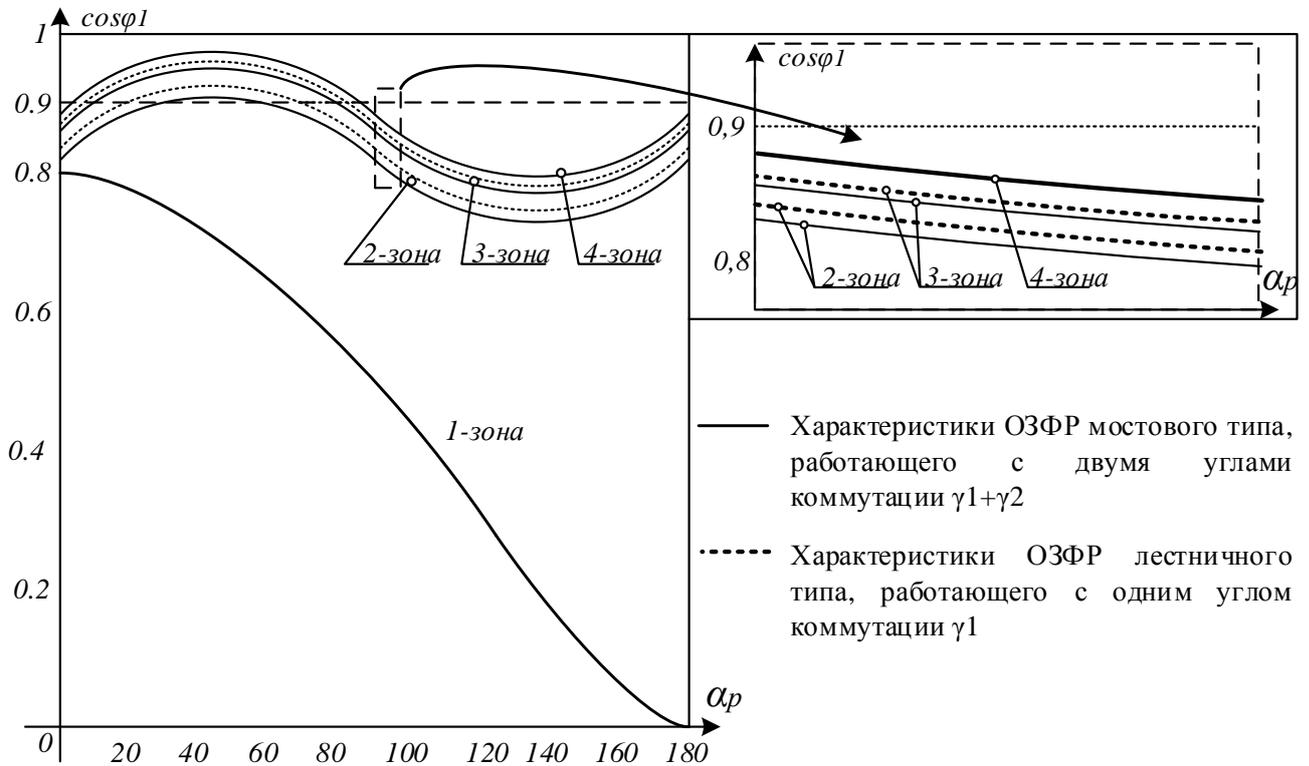


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента сдвига от угла открытия тиристоров

Выполнен расчет значений КПД для ОЗФР с мостовой и лестничной структурой, что позволило сравнить эффективность двух вариантов схем. В качестве примера были взяты параметры тягового однофазного трансформатора ОНДЦЭ-10000/25-82 и преобразователя ВИП – 4000 – УХЛ2.

КПД ОЗФР определяется выражением:

$$\eta = \frac{P_d}{P_d + \Delta P_{mp-ra} + \Delta P_{СПП}} = \frac{6426}{6510 + s_1 \cdot (\Delta P_{Тиристор}) + s_2 \cdot (\Delta P_{Диод})} \quad (3)$$

где,  $s_1, s_2$  - количество последовательных тиристоров и диодов в одном плече ОЗФР. Значение мощности потерь в одном вентиле –  $\Delta P_{Тиристор} = 1,0677 \text{ кВт}$ ,  $\Delta P_{Диод} = 0,935 \text{ кВт}$ .

Расчет потерь на вентилях ОЗФР показал, что значение КПД исследуемых вариантов схем существенно не меняется.

**В четвертой главе** описаны созданные имитационные модели в среде *Simulink* пакета *MATLAB* для изучения особенностей работы четырехзонного ОЗФР с лестничной структурой и новым алгоритмом управления тиристорами. За основу в диссертационной работе принят ОЗФР для грузового электровоза серии ВЛ85 на переменном токе. Он оснащен четырехзонным выпрямительно-инверторным преобразователем типа ВИП – 4000 – УХЛ2, работающим с тяговым трансформато-

ром типа ОНДЦЭ, параметры которых учтены при составлении моделей ОЗФР в среде *Simulink*, представленных на рисунке 10.

В ходе проведенных исследований получены мгновенные значения напряжений и токов для всех зон регулирования ОЗФР разных типов. Исследованы особенности переходных процессов для каждой зоны регулирования и получены экспериментальным путем энергетические характеристики ОЗФР.

На рисунке 11, а приведены кривые напряжений и токов тиристоров в процессе их коммутации для ОЗФР, работающего во второй зоне регулирования. Полученные результаты подтверждают основной недостаток ОЗФР мостовой типа – создание ими двойного контура коммутации.

Эти же результаты подтверждают, что ОЗФР с лестничной структурой (рисунок 11, б) обеспечивают разнесение контуров коммутации, за счет чего исключается образование двойного угла коммутации (кроме четвертой зоны регулирования).

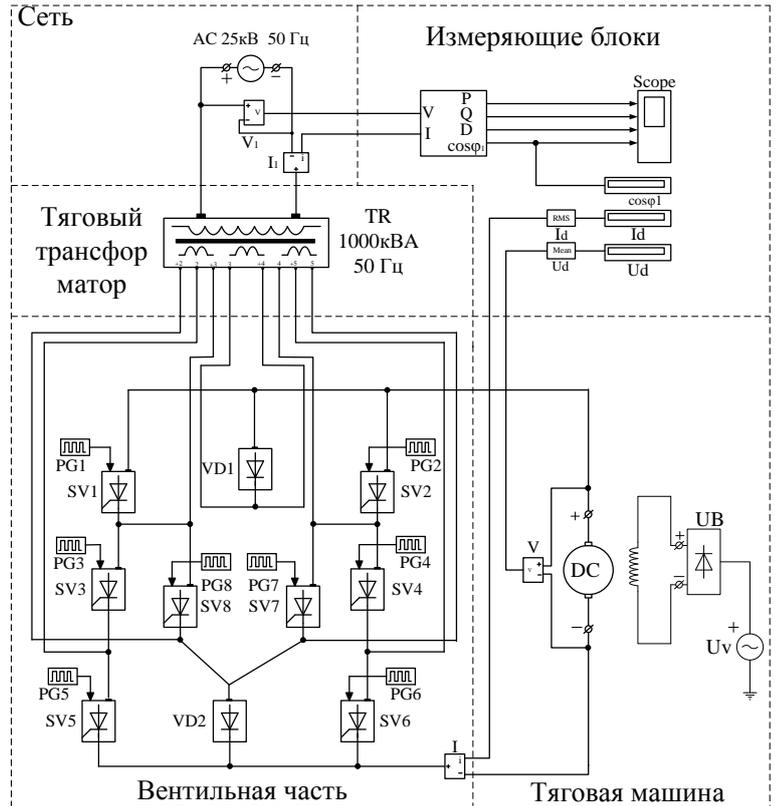


Рисунок 10 – Схема имитационной модели четырехзонного преобразователя с лестничной структурой

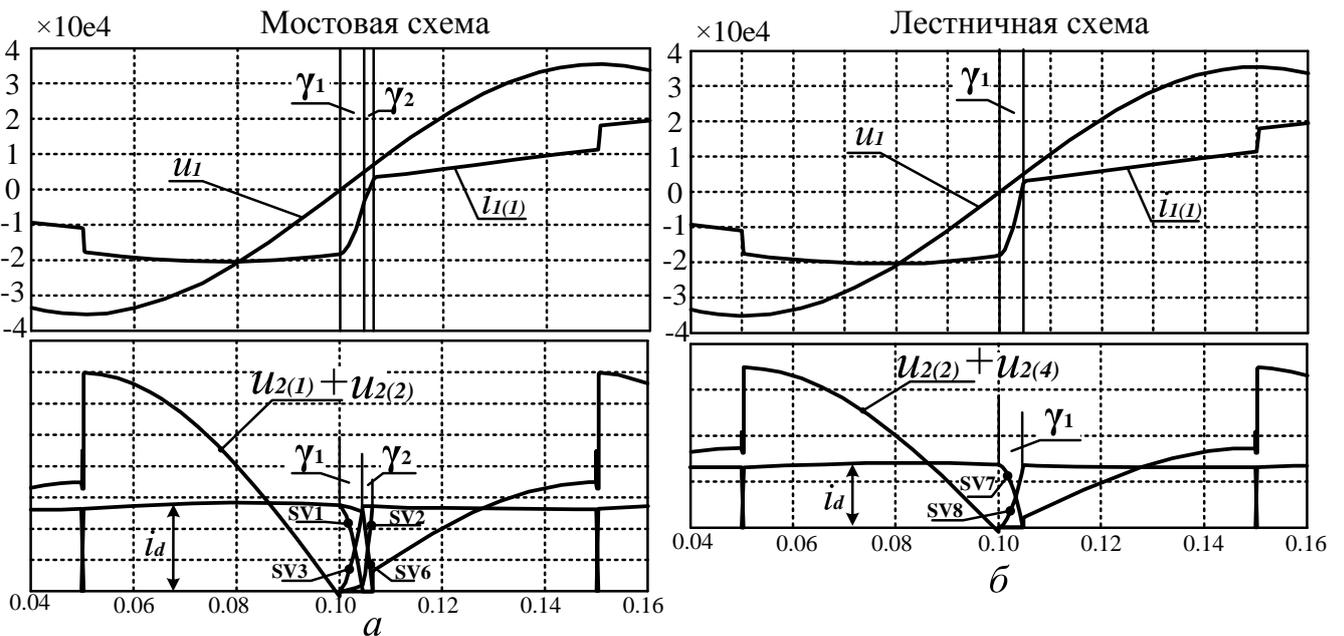


Рисунок 11 – Кривые напряжений и токов во второй зоне регулирования ОЗФР: а– с мостовой структурой, б– с лестничной структурой

По результатам экспериментов для обоих вариантов схем ОЗФР построен график зависимости коэффициента мощности от среднего выпрямленного напряжения для всех зон регулирования при активно-индуктивной нагрузке (рисунок 12).

Таким образом, доказана экономичность работы четырехзонного ОЗФР лестничного типа и работоспособность схемы управления тиристорами. Результат исследования на имитационных моделях подтвердил, что коэффициент мощности увеличивается в среднем на 3...5% на второй и третьей зоне регулирования по сравнению с классической мостовой схемой. Это объясняется уменьшением задержки углов отпирания тиристорov за счет исключения двойного контура коммутации в ОЗФР с лестничной структурой соединения тиристорov.

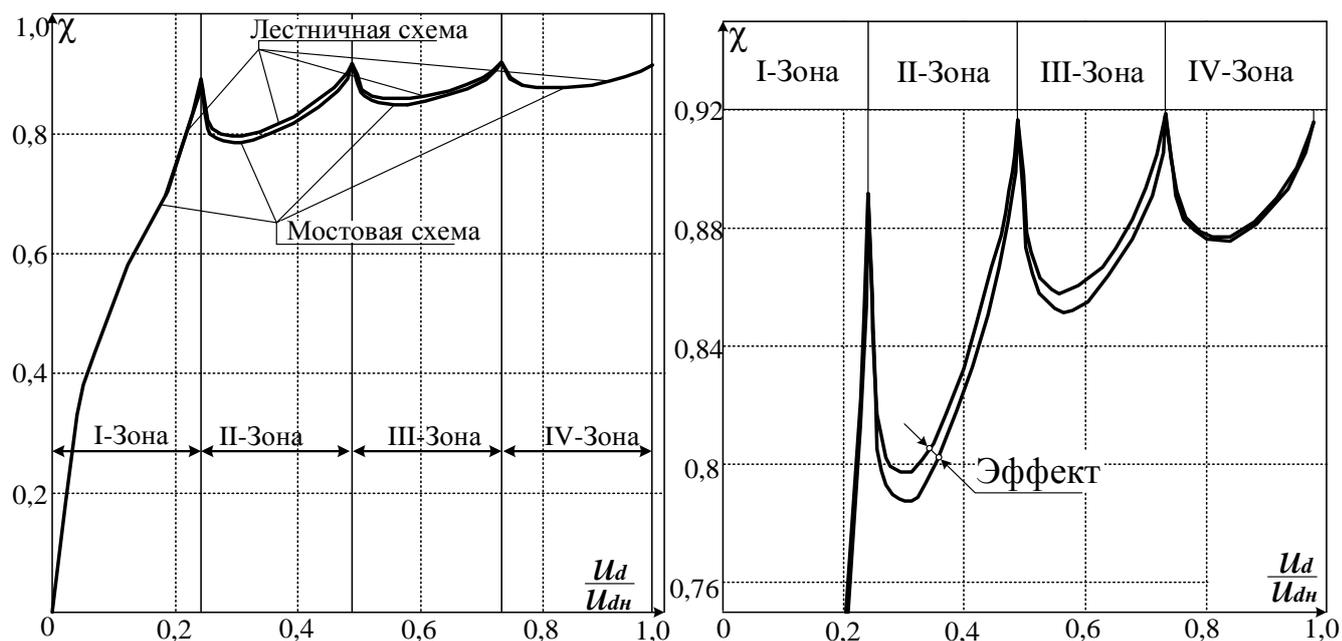


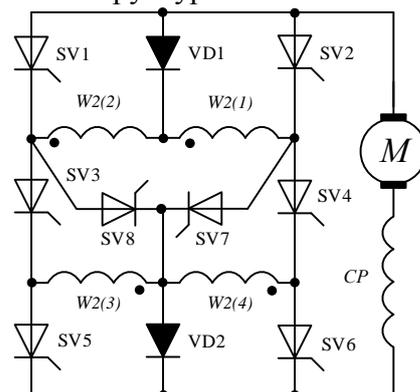
Рисунок 12 – Зависимости коэффициентов мощности четырехзонных преобразователей

**В пятой главе** проведено исследование выбранных схемных решений с помощью физических моделей. В программу экспериментов входило: определение работоспособности предложенного преобразователя, измерение параметров выпрямленного напряжения в режиме холостого хода, в режимах работы на активную и активно-индуктивную нагрузку, а также измерение энергетических показателей преобразователя. Результаты представлены в виде осциллограмм (табл.5).

В качестве активно-индуктивной нагрузки и противо-ЭДС использовался двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением. Экспериментально доказана возможность упрощения алгоритмов управления тиристорами при переходе на предложенную схему лестничного преобразователя, рекомендуемого для модернизации эксплуатируемого четырехзонного мостового преобразователя на электровозах ВЛ65, ВЛ80Р, ВЛ85, ЭП1. Предлагаемый вариант схемного решения ОЗФР имеет меньшее количество управляемых вентильных плеч по сравнению с известной мостовой схемой, что приводит к упрощению схемы управления, удешевлению и повышению надежности преобразователя.

Таблица 3 – Результаты экспериментов с активно-индуктивной нагрузкой (двигатель) для зонно-фазового преобразователя с лестничной структурой

№	Зоны				$I_d, A$	$U_d, B$	Форма $U_d$	Форма $I_d$
	1	2	3	4				
1	•				0,05	7,3		
2	•				1,29	7,7		
3	•				1,32	8,9		
4		•			1,37	11,6		
5		•			1,18	24,2		
6		•			1,33	37,0		
7			•		1,15	41,8		
8			•		1,08	45,5		
9			•		1,00	47,0		
11			•		0,99	51,3		
12			•		1,02	61,2		
13				•	0,99	67,0		
14				•	0,97	69,5		
15				•	0,97	73,2		
16				•	0,98	77,2		



Сравнение результатов экспериментов на физических моделях однофазного четырехзонного преобразователя с мостовой и лестничной структурой подтвердило, что лестничные схемы имеют более высокие значения коэффициента мощности, чем мостовые схемы преобразователей в среднем на 2 – 4 %.

#### В заключении сформированы следующие выводы по работе:

1. Проведена систематизация известных способов построения зонно-фазовых преобразователей и установлено, что в их основе лежат тиристорные мостовые схемы управляемых однофазных выпрямителей последовательного и параллельного типа.

2. Установлено, что в системах управления ТЭД электровозов на переменном токе наилучшими технико-экономическими показателями обладает 4-х зонный мостовой преобразователь параллельного типа, КПД которого достигает 0,98. Однако  $\chi$  такого преобразователя не превышает 0,8, что не удовлетворяет современным требованиям достижения энергетической эффективности.

3. Показано, что 4-х зонные преобразователи с мостовой структурой образуют двойной контур коммутации, приводящий к общей задержке времени отпирания тиристорov, что не только уменьшает рабочую часть периода преобразователя на 9-12%, но и ограничивает коэффициент мощности, который теоретически мог бы достигать значения 0,92.

4. Определен рациональный способ повышения  $\chi$  в зонно-фазовых преобразователях, который не требует дополнительной установленной мощности, поскольку он не связан с использованием компенсирующих устройств, а основан на со-

крашении продолжительности  $\gamma$  в перспективных преобразователях путем исключения вложенных двойных контуров коммутации.

5. Предложено схемное решение усовершенствованного однофазного 4-х зонного преобразователя лестничного типа и новый алгоритм управления тиристорами, который не образует двойных контуров коммутации и рекомендовано взамен существующему мостовому зонно-фазовому преобразователю на электровозах типа ВЛ85.

6. Проведен анализ коммутационных процессов и получены основные расчетные соотношения, показывающие, что переход к усовершенствованному варианту преобразователя с лестничной структурой позволяет увеличить  $\chi$  электровозов на 4 – 5 %, и пропорционально этому снизить потребление реактивной энергии.

7. Разработаны и созданы математические и физические модели, на основании которых подтверждена достоверность результатов теоретических исследований и энергетическая эффективность предложенного однофазного 4-х зонного преобразователя лестничного типа.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Джаборов М.М. Совершенствование четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой для электровозов переменного тока / М.М. Джаборов, Н.И. Щуров, С.В. Мятёж // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2013. - №6. - С 73 – 77.
2. Джаборов М.М. Совершенствование зонных выпрямителей / М.М. Джаборов, С.В. Мятёж, Н.И. Щуров // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. - №6. - С 40 – 45.
3. Джаборов М.М. Исследование коммутационных процессов и определение коэффициента мощности четырехзонных преобразователей в среде matlab/simulink / М.М. Джаборов, С.В. Мятёж, О.Л. Волкова // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. №2 (72). С. 121 – 129.
4. Евдокимов С.А. Выпрямители для систем распределенного электроснабжения железных дорог постоянным током / С.А. Евдокимов, Н.И. Щуров, С.В. Мятёж, М.М. Джаборов, А.А. Степанов // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. №2 (68). - С. 117 – 124.
5. Джаборов М.М. Четырехзонный выпрямитель лестничного типа для электровозов переменного тока / М.М. Джаборов, С.В. Мятёж, О.Л. Волкова // Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука Технологии Инновации». Новосибирск: НГТУ, 2012. - С. 349 – 350.
6. Джаборов М.М. Исследование четырехзонного выпрямителя с лестничной структурой для электрического транспорта / М.М. Джаборов, С.В. Мятёж // Сборник статей по материалам XIII—XIV международной заочной научно-практической конференции. — М., Изд. «Международный центр науки и образования», 2013. - С. 126 – 130.
7. Джаборов М.М. Преобразователи системы распределенного электроснабжения с улучшенной электромагнитной совместимостью / М.М. Джаборов, С.А. Евдокимов, Щуров Н.И., А.А. Степанов // Материалы XI Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения»: Т.7. Новосибирск: НГТУ, 2012. - С. 130 – 134.

Отпечатано в типографии Новосибирского  
государственного технического университета  
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20  
тел./факс. (383) 346-08-57  
Формат 60 х 64/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.  
Заказ № 812. Подписано в печать 19.06.2014 г.