

На правах рукописи



**Лонзингер Петр Владимирович**

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ  
ВЫПРЯМИТЕЛЯХ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ**

Специальность 05.09.12 – “Силовая электроника”

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор **Хохлов Юрий Иванович**

Официальные оппоненты:

**Томашевский Юрий Болеславович** д-р техн. наук проф., проф. кафедры "Электронные приборы и системотехника" федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов;

**Хакимьянов Марат Ильгизович** д-р. техн. наук доцент, доцент кафедры электротехники и электрооборудования предприятий федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева».

Защита состоится 22 октября 2019 г., в 10:00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте по адресу: [https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/0.20text\\_diss\\_2.pdf](https://www.susu.ru/sites/default/files/dissertation/0.20text_diss_2.pdf)

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, гл. корпус, Ученый совет ЮУрГУ, тел./факс +7 (351) 267-91-23, email: [grigorevma@susu.ru](mailto:grigorevma@susu.ru).

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
Д 212.298.05 доктор технических  
наук, доцент



Григорьев Максим Анатольевич

**Актуальность работы.** Потребление электроэнергии на постоянном токе, полученном за счет использования мощных полупроводниковых выпрямительных агрегатов, находит свое применение в широком спектре отраслей промышленности и транспорта. В качестве примера можно указать алюминиевую промышленность, в которой при производстве алюминия тратится до 15000-17000 кВт·ч на тонну алюминия. Помимо цветной металлургии, электроснабжение на постоянном токе используется и в других отраслях: электрохимии, электрифицированном транспорте и т.д. Подключение выпрямительных агрегатов к сетям переменного тока повышает значимость вопроса обеспечения показателей качества электроэнергии в пределах, регламентируемых ГОСТ, в точке передачи электроэнергии. Помимо этого, актуальной становится проблема потребления выпрямительным агрегатом реактивной мощности и ее компенсации.

Известно, что для управления режимом работы мощных выпрямительных агрегатов в настоящее время применяются фазовые способы регулирования (тиристорное управление, либо управление дросселями насыщения). При увеличении глубины регулирования управляемого параметра такими способами наблюдается значительное возрастание потребляемой выпрямительным агрегатом реактивной мощности.

Развитие компонентной базы устройств силовой электроники позволило создавать преобразователи напряжения большой мощности (до десятков МВА) на полностью управляемых полупроводниковых приборах (GTO тиристоры, IGBT транзисторы и т.д.), позволяющих получить на их зажимах переменного тока напряжения произвольной формы посредством применения широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Указанные преобразователи применяются для управления гибкими линиями электропередач переменного тока, в составе гибридных фильтров, улучшающих показатели качества электроэнергии, а также в качестве преобразователей частоты при осуществлении частотного асинхронного электропривода. Во всех перечисленных случаях это позволяет контролировать потоки мощности без увеличения потребляемой из сети реактивной мощности. Использование свойств преобразователей с ШИМ при управлении режимом работы мощных выпрямительных агрегатов является альтернативой фазовым способам регулирования, позволяющей повысить энергоэффективность процесса выпрямления.

Все вышесказанное свидетельствует об актуальности диссертационного исследования, в процессе которого проводится изучение влияния преобразователей напряжения с ШИМ на электромагнитные процессы в мощных выпрямительных агрегатах и связанной с ними питающей электрической сети.

**Степень научной разработанности проблемы.** Схемы, электромагнитные процессы и режимы работы устройств силовой электроники рассмотрены во многих публикациях. В работах С.Р. Глинтерника, И.М. Чиженко, Ю.И. Хохлова, Г.С. Зиновьева, Ю.К. Розанова, М.В. Гельмана и др. рассмотрены различные схемы, электромагнитные процессы и режимы работы управляемых и неуправляемых вентильных преобразователей.

А.Д. Поздеев рассматривал тиристорные вентильные преобразователи в качестве звена замкнутой системы управления. Однако при этом не рассматривались компенсированные варианты полупроводниковых выпрямителей.

В работах Е.Е. Чаплыгина рассматривалось математическое моделирование квазиустановившихся режимов работы полностью управляемых вентильных блоков. При этом не учитывалась возможность работы полностью управляемых вентильных преобразователей в комплексе, включающем в себя диодные выпрямительные агрегаты.

А.И. Чивенков, Н. Akagi, Narain G. Hingorani рассматривали применение объединенных регуляторов потоков мощности для управления режимом работы различных электрических сетей, комплексов и систем.

L.A.C. Lopes, T. Selim, N. Goel, W.G. Dunford, E. Acha, S. Bhim, H. Patangia и многие другие рассматривали частные вопросы применения полностью управляемых вентильных преобразователей для электропривода, в качестве активных фильтров, рассматривали выбор низкочастотных фильтров для полностью управляемых вентильных преобразователей с ШИМ и т.д.

Возможность применения полностью управляемых вентильных преобразователей с ШИМ для управления режимом работы компенсированных диодных выпрямительных агрегатов предложена в патентах Ю.И. Хохлова.

В изученных автором публикациях не были в достаточной степени рассмотрены особенности расчета квазиустановившихся электромагнитных процессов в компенсированных выпрямителях с векторным управлением. Не описаны частные вопросы выбора низкочастотных фильтров для полностью управляемых вентильных преобразователей, применяемых для регулирования режима работы компенсированных выпрямителей. Вопросы построения системы управления компенсированных выпрямителей с векторным управлением и выбора ее структуры также не рассмотрены в достаточной степени.

**Объект исследования** – компенсированные выпрямительные агрегаты, управление режимом работы которых осуществляется преобразователями напряжения с ШИМ.

**Предмет исследования** – электромагнитные процессы, способы управления, внешние и энергетические характеристики, режимы работы

компенсированных выпрямительных агрегатов, управляемых устройствами, построенными на основе преобразователей с ШИМ.

**Цель диссертационной работы** – повышение энергетической эффективности процесса выпрямления переменного тока компенсированными выпрямительными агрегатами с векторным управлением.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Провести патентно-литературный обзор в областях управления полупроводниковыми выпрямительными агрегатами и применения преобразователей с ШИМ в электроэнергетических комплексах

2. Сопоставить между собой схемные решения компенсированных выпрямителей с векторным управлением, рассмотреть их достоинства и недостатки.

3. Разработать теоретические положения квазиустановившихся электромагнитных процессов в компенсированных выпрямителях с векторным управлением, рассчитать внешние и энергетические характеристики выпрямителей при различных параметрах вносимого в контур коммутации синусоидального напряжения управления.

4. Определить параметры Г-образных фильтров с учетом специфики квазиустановившихся электромагнитных процессов в устройстве векторного управления.

5. Получить характеристики переходных процессов в компенсированных выпрямителях с векторным управлением при помощи компьютерного моделирования. Оценить устойчивость системы управления компенсированным выпрямителем с векторным управлением, построенной на основе ПИ-регулятора.

6. Оценить степень достоверности полученных теоретических результатов при помощи физического моделирования компенсированных выпрямителей с векторным управлением.

**Методы исследования.** Аппарат линейной алгебры, теории автоматического управления, математического анализа, теории электрических цепей, обыкновенных дифференциальных уравнений, рядов Фурье. Расчеты автоматизированы в программе Mathcad. Компьютерное моделирование произведено в программном пакете MATLAB/Simulink. Экспериментальное исследование произведено на лабораторном оборудовании.

**Достоверность** полученных положений, выводов и рекомендаций обусловлена корректным применением математического аппарата, подтверждается сравнением результатов теоретического исследования с результатами компьютерного моделирования, качественным соответствием их результатам, полученным при физическом моделировании.

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель компенсированного выпрямителя с векторным управлением в квазиустановившемся режиме, отличающаяся учетом влияния потока мощности в устройстве векторного управления на статические характеристики исследуемого преобразователя.

2. Модель, имитирующая компенсированный выпрямитель с векторным управлением как замкнутую систему управления на основе ПИ-регулятора, отличающаяся наличием обратной связи по току питающей сети, предназначенной для компенсации падений напряжения в низкочастотном фильтре устройства векторного управления.

### **Научная новизна диссертационной работы:**

1. Разработан способ управления многофазным выпрямительным агрегатом, устройство векторного управления которого состоит из двух преобразователей с ШИМ и получает питание от дополнительной обмотки преобразовательного трансформатора.

2. Разработаны теоретические положения квазиустановившихся электромагнитных процессов, рассчитаны внешние и энергетические характеристики компенсированных преобразователей с векторным управлением.

3. Представлен подход к нахождению параметров Г-образных фильтров с учетом специфики квазиустановившихся электромагнитных процессов в устройстве векторного управления.

4. Получены характеристики переходных процессов в компенсированных выпрямителях с векторным управлением, регулирование режима работы которых осуществляется в замкнутой системе управления с ПИ-регулятором. Определены границы устойчивости переходного процесса управления в зависимости от параметров регулятора.

5. Проведено экспериментальное исследование выпрямителей с векторным управлением. Результаты экспериментальных исследований качественно соответствуют результатам теоретических исследований и компьютерного моделирования.

### **Практическая значимость, реализация и внедрение результатов.**

Разработаны теоретические основы для практической реализации компенсированных выпрямителей с векторным управлением. Применение компенсированных преобразователей с векторным управлением позволит производить регулирование режима работы электроприемников постоянного тока без увеличения потребляемой из сети реактивной мощности. Результаты внедрены в учебный процесс при подготовке магистров по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» в Южно-Уральском государственном университете (НИУ). На основе результатов исследования разрабатываются варианты

реконструкции преобразовательной подстанции Электролизного цеха ПАО «Челябинский цинковый завод».

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: 53-й международной научной студенческой конференции МНСК–2015; 68-й научной конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский государственный университет, 2016; Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере 2016»; 35-й Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (январь 2018); 36-й Международной научной конференции Евразийского Научного Объединения (февраль 2018).

**Публикации.** Основное содержание работы опубликовано в 10 печатных трудах, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ, получен патент на изобретение.

**Личный вклад автора.** В научных трудах, в том числе написанных в соавторстве, автору принадлежит математическая модель выпрямителя с векторным управлением в квазиустановившемся режиме с учетом влияния потока мощности в устройстве векторного управления, принадлежат результаты по определению протекающих в компенсированных выпрямителях с векторным управлением квазиустановившихся электромагнитных процессов, внешних и энергетических характеристик. Автору принадлежат результаты усовершенствования модели компенсированного выпрямителя с векторным управлением с замкнутой системой управления на основе ПИ-регулятора, результаты компьютерного моделирования переходных процессов в двенадцатифазном компенсированном выпрямителе с векторным управлением, результаты экспериментального исследования компенсированных выпрямителей с векторным управлением.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 118 наименований и приложений. Работа изложена на 200 страницах машинописного текста, в том числе 104 рисунка и 11 таблиц.

**Соответствие научной специальности:** исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, соответствует формуле и области исследования, приведенным в паспорте специальности 05.09.12, в частности, пунктам 2, 4 и 5.

### **Содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, обоснованы научная новизна и практическая значимость результатов, представлены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассматриваются силовые схемы полупроводниковых преобразователей, приводится их классификация. В главе описаны различные способы управления режимом работы силовых полупроводниковых преобразователей, выявлены их достоинства и недостатки. По результатам рассмотрения делается вывод о целесообразности применения компенсированных выпрямителей с векторным управлением и фильтрацией в коммутирующие конденсаторы нечетно-кратных гармоник входных токов преобразовательных блоков (рисунок 1) для электроснабжения потребителей постоянного тока в тех случаях, когда установка активных выпрямительных агрегатов является нецелесообразной.

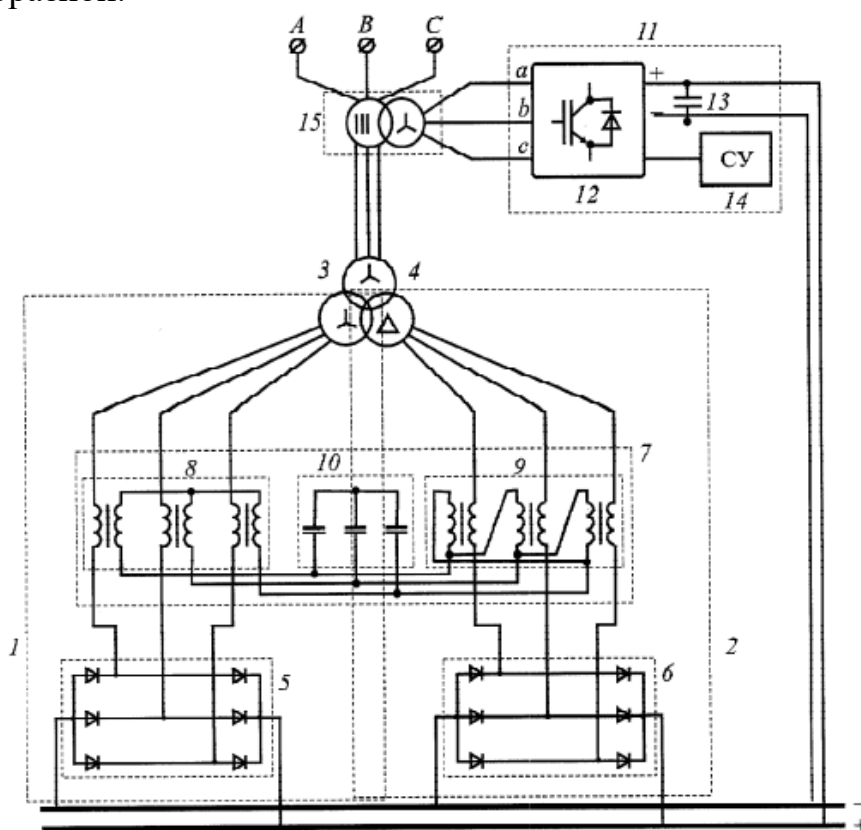


Рисунок 1 – Компенсированный двенадцатифазный выпрямитель с векторным управлением (одна из схем, рассматриваемых в работе)

Отмечено, что в существующих публикациях недостаточно глубоко описаны особенности определения электромагнитных процессов в компенсированных выпрямителях с векторным управлением. Поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** предложена схема выпрямительного агрегата, устройство векторного управления (ВВУ) которого получает питание от дополнительной обмотки преобразовательного трансформатора (рисунок 2). Для данной схемы, в случае полной компенсации мощности искажения, токи обмоток вольтодобавочного трансформатора не содержат высших гармоник.



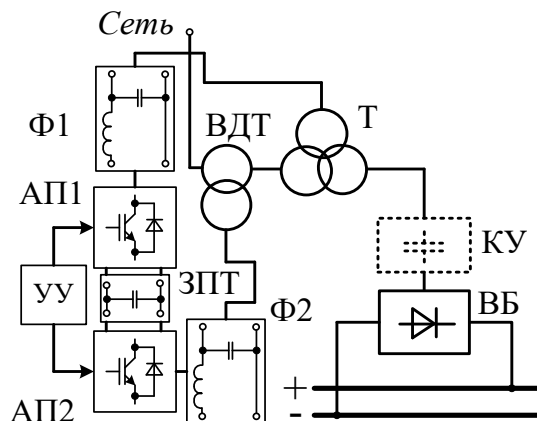


Рисунок 2 – Схема с забором мощности от дополнительной обмотки преобразовательного трансформатора

В главе исследованы электромагнитные процессы, получены внешние и энергетические характеристики для различных схем 2-х фазных и 12-фазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением.

Для упрощения аналитических исследований вводится следующая математическая модель. Силовая схема выпрямителя разделяется на две части: основной выпрямитель и УВУ. В этой главе исследуется основной выпрямитель, в котором влияние УВУ учитывается идеальными источниками тока и ЭДС (рисунок 3).

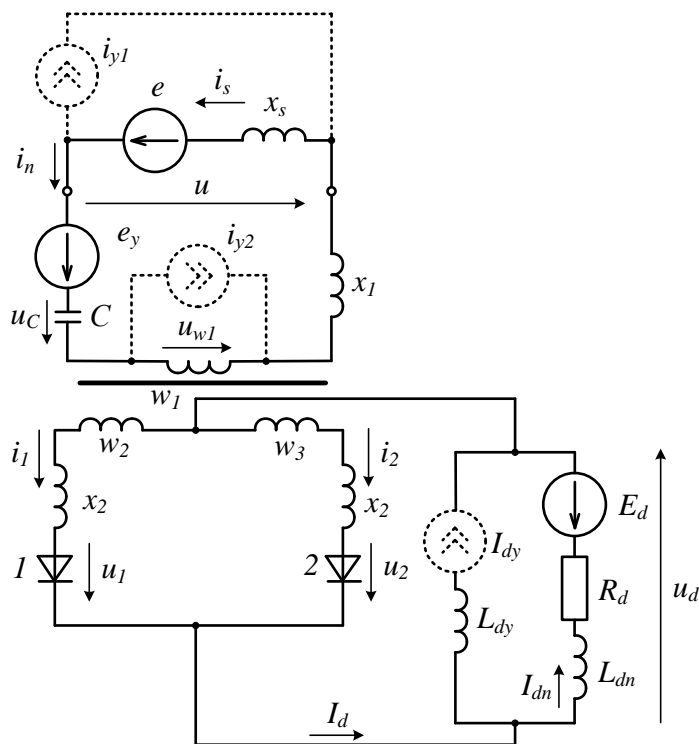


Рисунок 3 – Основной выпрямитель (двухфазная нулевая схема)

Активная мощность, пропускаемая через устройство векторного управления, в общем случае учитывается формулой:

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum e_y i_n d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \sum u_i i_y d\theta. \quad (1)$$

Здесь  $e_y$  – ЭДС управления,  $i_n$  – токи вторичной обмотки вольтодобавочного трансформатора управления;  $u_i$  – напряжения на зажимах идеальных источников тока;  $i_y$  – токи идеальных источников тока.

Далее влияние источников тока на процессы в основном выпрямителе учитывается заменой ЭДС питающей сети на эквивалентную ЭДС. Условие эквивалентной замены – сохранение магнитных потоков преобразовательного трансформатора. После эквивалентной замены составляются дифференциальные уравнения, описывающие процессы в основном выпрямителе. Затем процессы исследуются методом кусочно-линейной аппроксимации ВАХ диодов и согласования решений на участках периода питающей сети.

Описанным методом найдены временные зависимости электромагнитных процессов в двухфазных и двенадцатифазных выпрямителях. Совместное решение уравнения (1) с полученными методом кусочно-линейной аппроксимации зависимостями позволяет получить параметры электромагнитных процессов для каждой из рассматриваемых схем. С использованием этих параметров для указанных выпрямителей найдены внешние и энергетические характеристики. На рисунке 4 они представлены для преобразователя, показанного на рисунке 1 ( $\nu$  – относительная собственная частота контура коммутации).

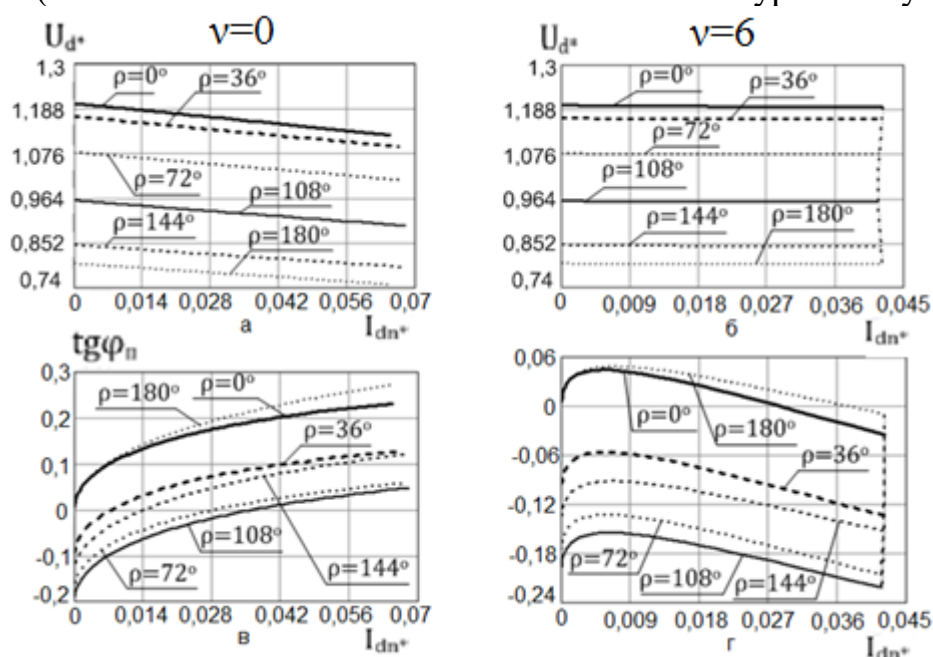


Рисунок 4 – Внешние и энергетические характеристики

Анализ внешних и энергетических характеристик позволил сформулировать рекомендации, которым следует придерживаться при сопоставлении различных схем компенсированных выпрямителей с векторным управлением и определении рабочей точки режима нагрузки постоянного тока.

**В третьей главе** определены параметры Г-образных фильтров полностью управляемых вентильных блоков УВУ с учетом особенностей протекающих в нем квазиустановившихся электромагнитных процессов. Расчет выполнен с учетом потерь электрической энергии в фильтрах для двенадцатифазного выпрямителя (см. рисунок 1).

Рассматривается УВУ, выполненное на основе двух параллельных полностью управляемых вентильных блоков (рисунок 5). Для формирования выходных напряжений УВУ используется ШИМ-2 со сдвигом опорных напряжений. На основе результатов расчета квазиустановившихся процессов в основном выпрямителе произведен выбор параметров выходного и входного Г-образных фильтров.

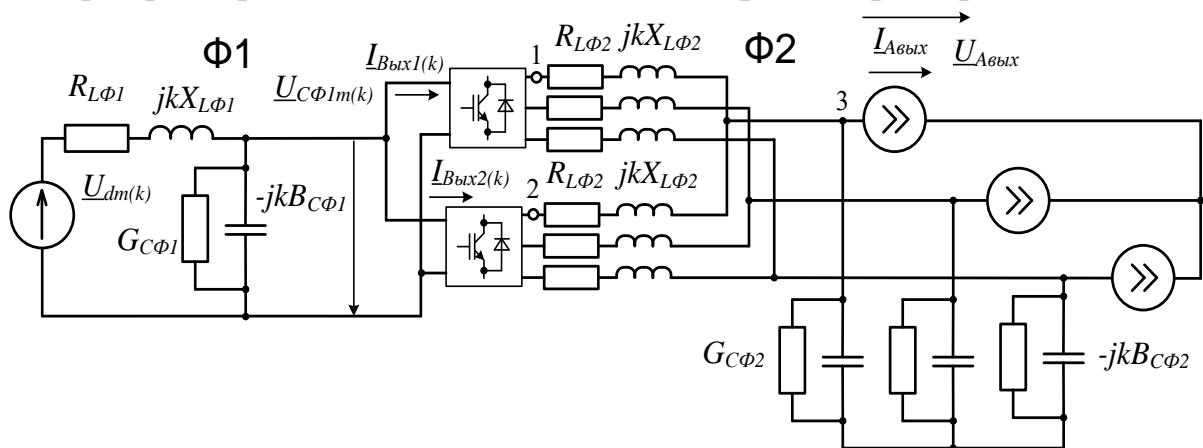


Рисунок 5 – Схема замещения УВУ на  $k$ -й гармонике

При выбранных параметрах фильтра произведен первичный расчет (без учета потерь от высших гармоник токов, создаваемых ШИМ) протекающих в УВУ квазиустановившихся электромагнитных процессов с целью определения постоянной составляющей напряжений на выходе фильтра Ф1. При принятых значениях параметров и угле коммутации  $\gamma = 13$  град постоянная составляющая названного напряжения  $U_{C\phi1(0)*} = 1,17$ . На основании этого получены задающие воздействия на входе полностью управляемых вентильных блоков, при применении которых компенсируются падения напряжения на фильтре Ф2 от канонических высших гармоник его выходного тока.

С использованием задающих воздействий (ключи вентильных блоков идеальны) рассчитаны ключевые и схемные переключающие функции. Посредством численного разложения схемных переключающих функций в ряд Фурье определены временные диаграммы и спектральный

состав токов и напряжений в УВУ с учетом потерь электроэнергии. Выходное напряжение фильтра Ф2 в фазе А и ток на входе фильтра Ф1 показаны на рисунках 6а и 7а соответственно вместе с их спектральным составом (рисунки 6б и 7б).

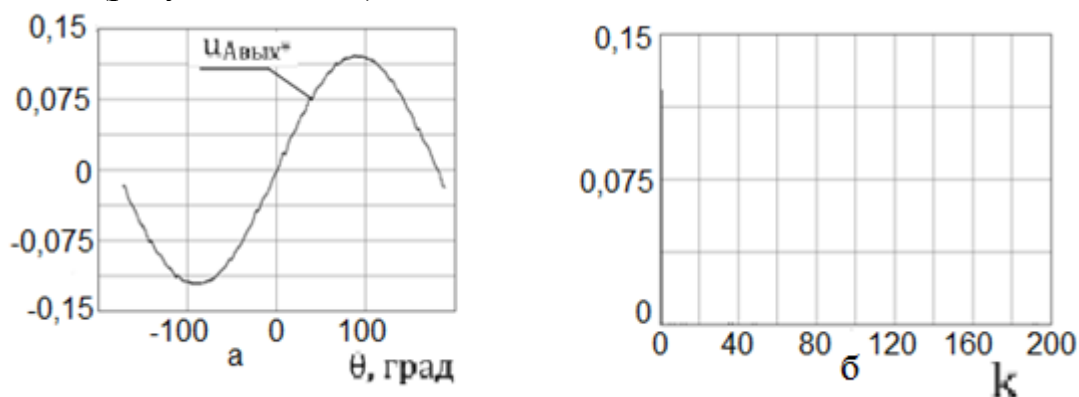


Рисунок 6 – Выходное напряжение в фазе А УВУ

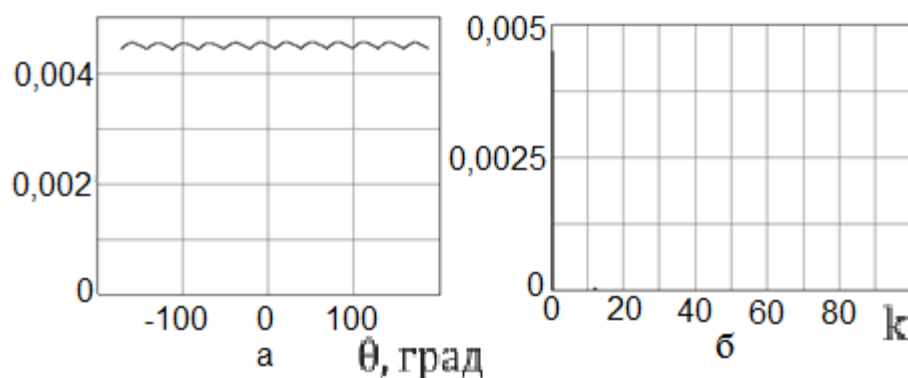


Рисунок 7 – Ток на входе УВУ

По результатам проведенного в главе 3 исследования сделаны следующие выводы. На основе найденных временных диаграмм и спектральных составов можно говорить о достоверности результатов, полученных в главе 2. Наличие высших гармоник в сетевом токе выпрямителя выдвигает на первый план при выборе параметров выходного фильтра УВУ резонансную частоту, что сказывается на увеличении его параметров. Протекание по обмотке высшего напряжения ВДТ токов с содержанием высших гармоник требует применения соответствующих задающих воздействий для компенсации падений напряжения на высших гармониках. Это приводит к увеличению амплитуды задающих воздействий и необходимости увеличения коэффициента трансформации ВДТ УВУ в целях отдаления границы насыщения модуляторов. В результате возникает необходимость увеличения параметров по току полностью управляемых вентильных блоков.

**В четвертой главе** приводится компьютерная модель в программном пакете MATLAB Simulink (рисунок 8), предназначенная для нахождения характеристик переходных процессов, протекающих в

двенадцатифазном компенсированном выпрямителе с векторным управлением (см. рисунок 1). Регулирование режима работы выпрямителя осуществляется в замкнутой системе управления с ПИ-регулятором. Моделирование осуществляется методом ode3 (Bogacki-Shampine) с шагом  $T_s = 2 \text{ мкс}$ . Параметры модели выбраны так, чтобы токи и напряжения были выражены в относительных единицах. Параметры фильтров соответствуют найденным в главе 3. Данная модель имеет обратную связь по токам питающей сети для формирования задающих воздействий вентильных блоков устройства векторного управления. Формирование задающих воздействий осуществляется подсистемой «mu\_shim» (рисунок 9).

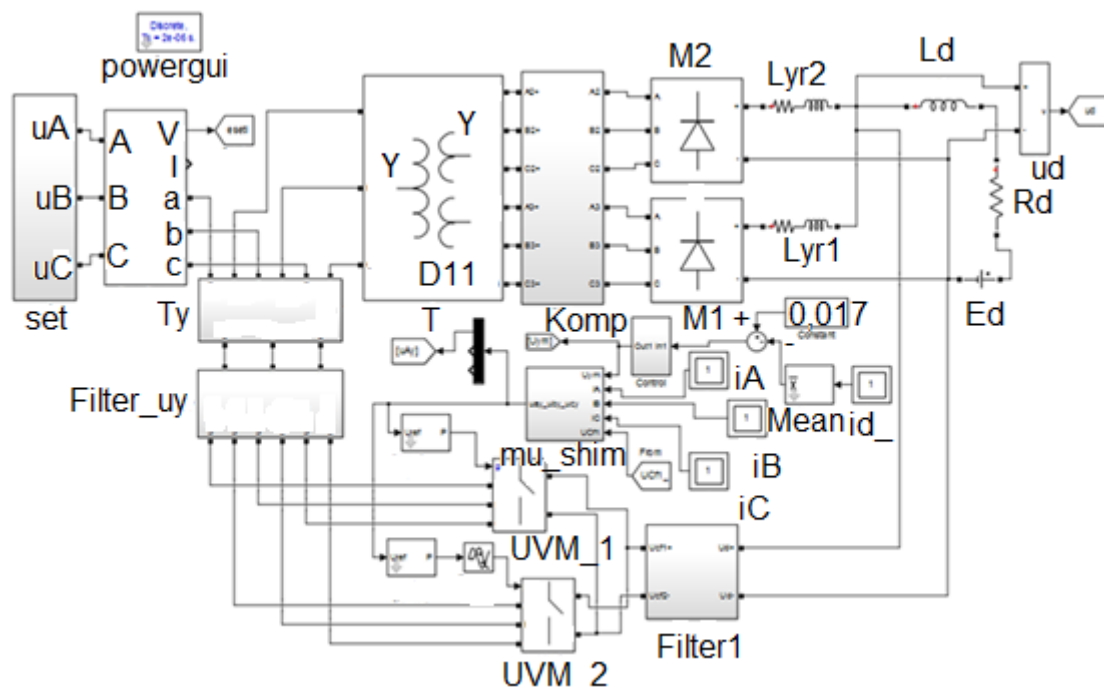


Рисунок 8 – Модель двенадцатифазного выпрямителя с векторным управлением

Широтно-импульсная модуляция протекает при частоте 4800 Гц. Ключи блоков «UVM\_1» и «UVM\_2» идеальные. Структура подсистемы «Tu» выполнена так, чтобы до момента  $T = 0,2 \text{ с}$  выход устройства векторного управления был отсоединен. Влияние устройства векторного управления имитируется трехфазной системой ЭДС. В течение 0,2 с от начала моделирования электромагнитные процессы в выпрямителе стремятся к таковым в квазиустановившемся режиме. В момент  $T = 0,2 \text{ с}$  включается выход устройства векторного управления, амплитуда напряжения сети увеличивается на 10%. Уравнительные реакторы представлены индуктивностями  $L_{yr1} = L_{yr2} = 0,4396 \text{ Гн}$ . Нагрузка  $Ld-Rd-Ed$  имеет параметры  $L_d = 1,3187 \text{ Гн}$ ,  $E_d = 0 \text{ В}$ . В квазиустановившемся режиме ток нагрузки  $I_{dn*} = 0,017$ , выпрямленное напряжение  $U_{d*} =$

1,196 . Все активные сопротивления основного выпрямителя, за исключением  $R_d$ , приняты равными нулю.

Переходные процессы, протекающие в модели, исследованы при различных значениях параметров ПИ-регулятора. Установлено, что при выбранных параметрах граница устойчивости процесса управления находится при следующих значениях параметров регулятора: пропорциональный канал  $P = 50 \dots 60$  ; интегральный канал  $I = 2000 \dots 2500$ .

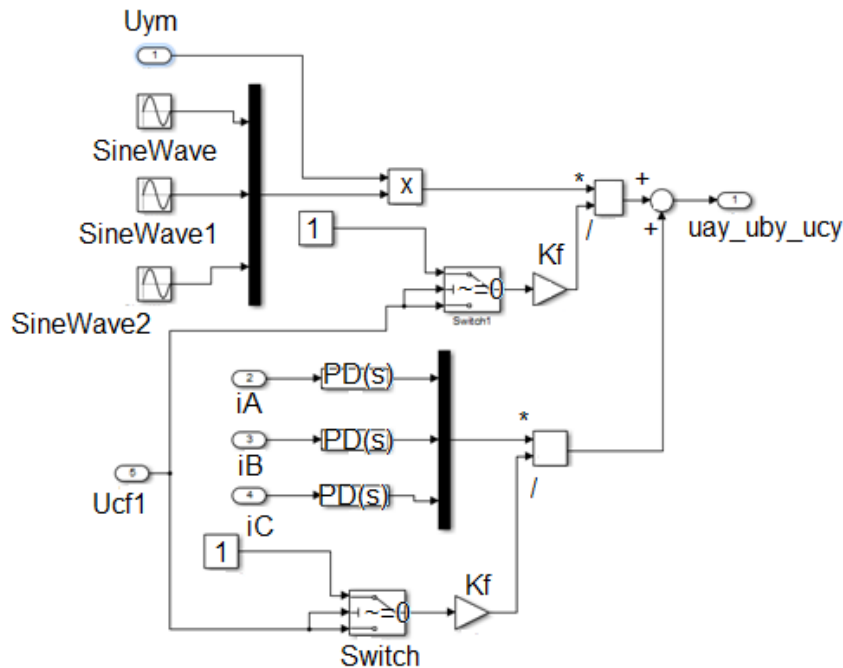


Рисунок 9 – Подсистема формирования задающих воздействий для вентильных блоков (подсистема «*tu\_shim*»)

Рисунок 10 иллюстрирует переходный процесс при значениях параметров ПИ-регулятора  $P = 10$  ;  $I = 800$  в течение интервала  $T = 0,2 \dots 0,5$ с. Переходный процесс после приложения в момент  $T = 0,2$ с возмущающего воздействия затухает за 6-7 периодов с последующим изменением выпрямленного тока в пределах 1-2%. Отклонение выпрямленного напряжения колеблется вокруг нулевого значения, что обусловлено как работой отрицательной обратной связи, так и наличием в составе выходных напряжений фильтра «*Filter\_uu*» переходных составляющих, изменяющихся с резонансной частотой фильтра  $f_{рез} = 464,2$  Гц.

Результаты компьютерного моделирования показывают принципиальную возможность протекания затухающего переходного процесса в компенсированном выпрямительном агрегате с векторным управлением при обратной связи с ПИ-регулятором. При выбранных параметрах затухание переходного процесса проходит с максимальным превышением величины выпрямленного тока на 20%.

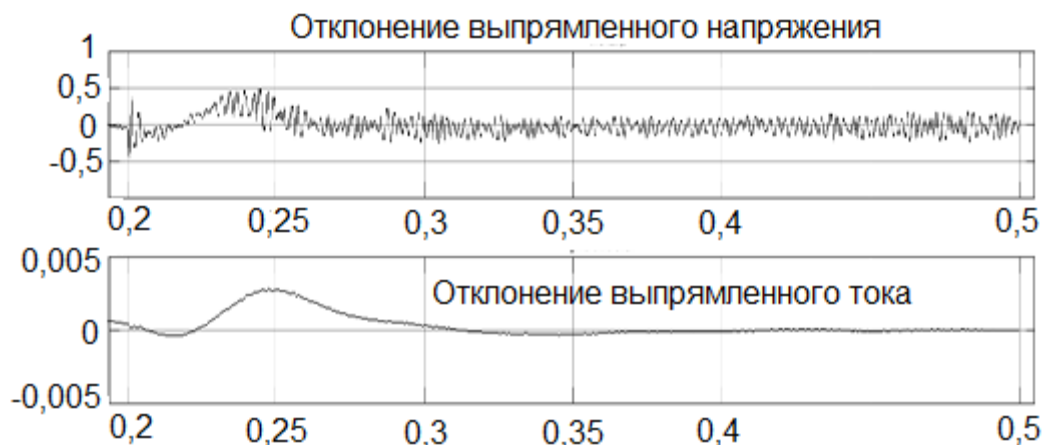


Рисунок 10 – Результаты компьютерного моделирования

По мере затухания переходного процесса управления кривые токов и напряжений выпрямительного агрегата приближаются к таковым в квазиустановившемся основном режиме. Полученные результаты моделирования переходных процессов должны быть использованы для установления фактов не превышения протекающими токами и напряжениями на диодах вентильных блоков и конденсаторах фильтров максимально допустимых значений.

**В пятой главе** оценена степень достоверности полученных теоретических результатов при помощи физического моделирования выпрямителей с векторным управлением. Физическое моделирование проведено для двенадцатифазного и двухфазного выпрямительных агрегатов. Для двенадцатифазного выпрямителя исследованы экспериментальные внешние характеристики и осциллограммы (рисунки 11 и 12).

Для двухфазного выпрямителя сняты временные диаграммы и внешние характеристики физическим и компьютерным моделированием. Внешние характеристики изображены на рисунке 13. Проведено сопоставление данных результатов, выявлены причины расхождений, а именно: 1) при проведении исследования на реальной физической модели напряжения питающей сети и управления содержат высшие гармоники, что отсутствует при компьютерном моделировании; 2) используемые в модели параметры вольтодобавочного трансформатора не учитывают изменения сопротивлений его обмоток; 3) различие мощностей короткого замыкания в точке подключения к питающей сети при компьютерном и физическом моделированиях; 4) погрешность при определении коэффициента модуляции; 5) прочие неучтенные факторы.

Установлено, что имеется качественное соответствие между экспериментальными данными и данными компьютерного моделирования, а также качественное соответствие временных диаграмм, исследованных в модели, теоретическим зависимостям.

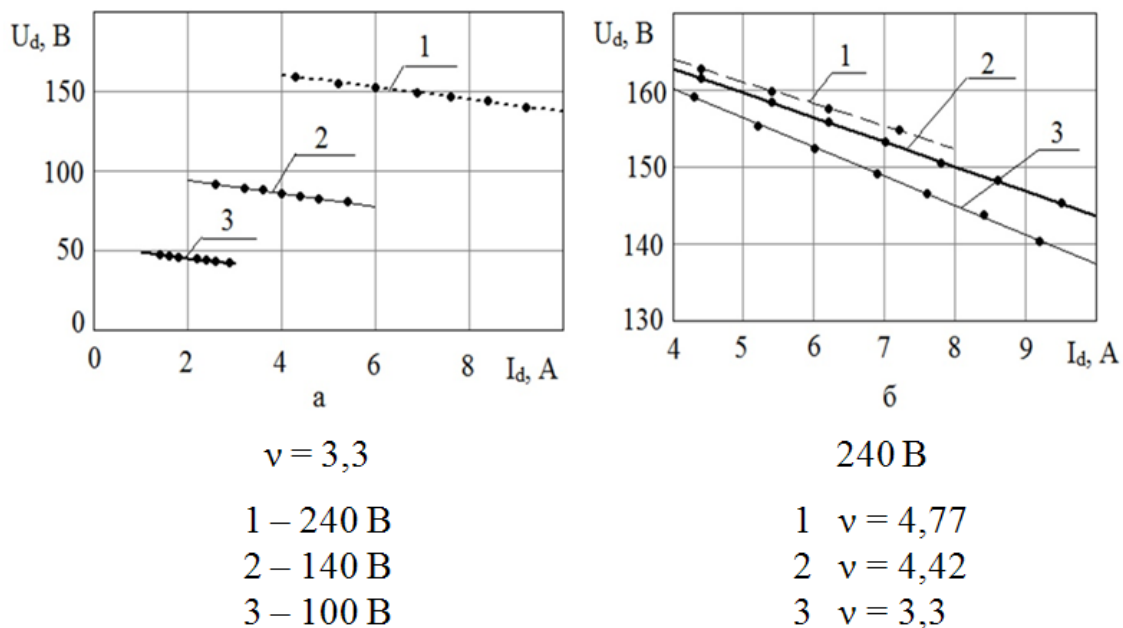
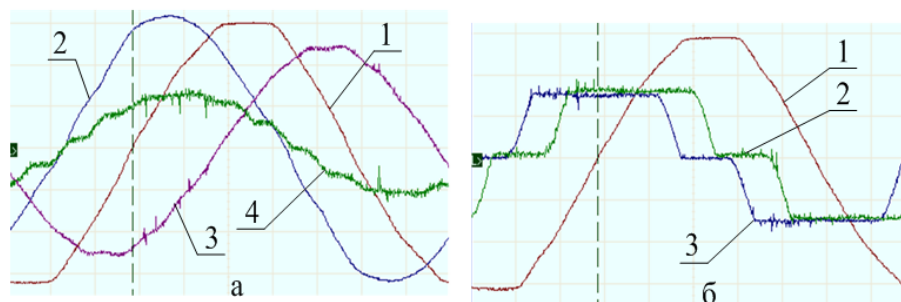


Рисунок 11 – Внешние характеристики двенадцатифазного компенсированного выпрямителя с векторным управлением

$m_t = 2$  мс/дел       $C = 32$  мкФ ( $v = 4,42$ )      240 В



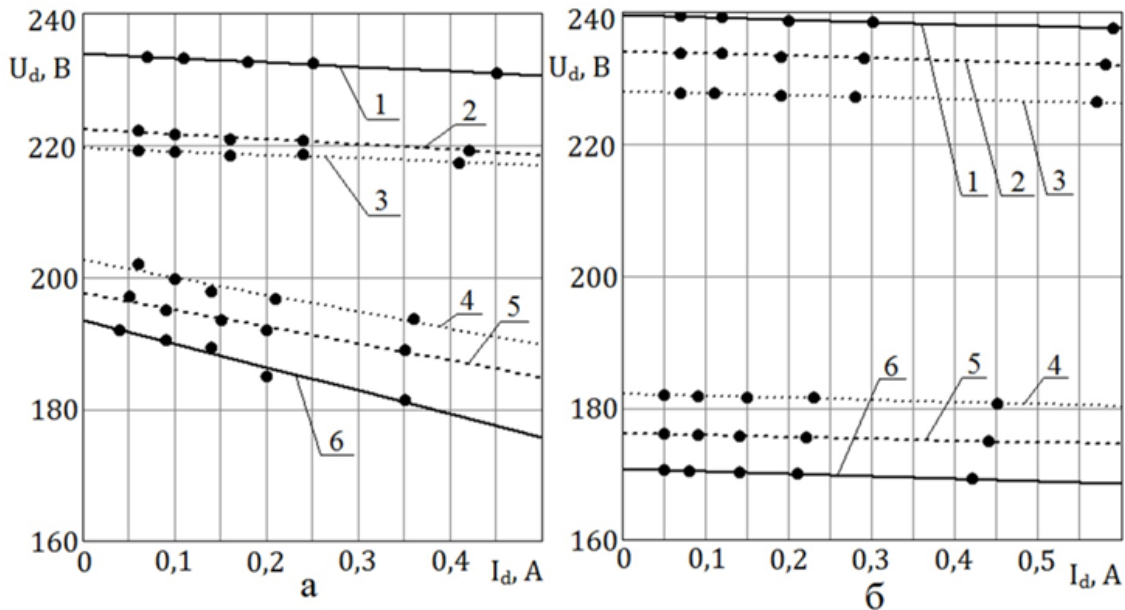
1 – напряжение питающей сети (фаза А)  
2 – напряжение на входе выпрямителя (фаза А)  
 $m_U = 100$  В/д  
3 – ток сети (фаза А)  $m_I = 1$  А/д  
4 – ток на входе преобразователя (фаза А)  $m_I = 2$  А/д

1 – напряжение питающей сети (фаза А)  $m_U = 100$  В/д  
2 и 3 – токи на входе выпрямительных блоков (фаза А)  $m_I = 1$  А/д

85

Рисунок 12 – Временные диаграммы токов и напряжений двенадцатифазного компенсированного выпрямителя с векторным управлением





**1 –  $\mu=0,75$   $\rho= 0^\circ$ ; 2 –  $\mu=0,63$   $\rho= 0^\circ$ ; 3 –  $\mu=0,5$   $\rho= 0^\circ$ ;  
 4 –  $\mu=0,75$   $\rho= 180^\circ$ ; 5 –  $\mu=0,63$   $\rho= 180^\circ$ ; 6 –  $\mu=0,5$   $\rho= 180^\circ$ ;**

Рисунок 13 – Внешние характеристики двухфазного некомпенсированного выпрямителя с векторным управлением

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования разработаны теоретические положения и подходы для повышения энергетической эффективности процесса выпрямления переменного тока компенсированными выпрямительными агрегатами с векторным управлением. Автором разработана математическая модель компенсированного выпрямителя с векторным управлением в квазиустановившемся режиме, отличающаяся учетом влияния потока мощности в устройстве векторного управления на статические характеристики исследуемого преобразователя. Автор также представил модель, имитирующую компенсированный выпрямитель с векторным управлением как замкнутую систему управления на основе ПИ-регулятора, отличающуюся наличием обратной связи по току питающей сети, предназначенной для компенсации падений напряжения в низкочастотном фильтре устройства векторного управления.

Основные результаты диссертационного исследования:

1. Предложен способ векторного управления, отличающийся подключением входа устройства векторного управления к дополнительной обмотке преобразовательного трансформатора.

2. Разработаны теоретические положения квазиустановившихся электромагнитных процессов, рассчитаны внешние и энергетические характеристики компенсированных преобразователей с векторным управлением.

3. Определены параметры Г-образных фильтров с учетом специфики квазиустановившихся электромагнитных процессов в устройстве векторного управления. Показан способ определения квазиустановившихся процессов в устройстве векторного управления. Даны рекомендации по выбору резонансной частоты выходного фильтра устройства, коэффициента трансформации ВДТ и параметров силовых ключей полностью управляемых вентильных блоков.

4. Разработана компьютерная модель для исследования переходных процессов в двенадцатифазном выпрямителе с векторным управлением. Получены характеристики переходных процессов в компенсированных выпрямителях с векторным управлением, регулирование режима работы которых осуществляется в замкнутой системе управления с ПИ-регулятором. Установлено, что при выбранных параметрах граница устойчивости процесса управления находится при следующих значениях параметров регулятора: пропорциональный канал  $P = 50 \dots 60$  ; интегральный канал  $I = 2000 \dots 2500$  . Представлены практические рекомендации по выбору параметров ПИ-регулятора и силовых элементов выпрямителя.

5. Проведено экспериментальное исследование выпрямителей с векторным управлением. Показано качественное соответствие результатов экспериментального исследования результатам компьютерного моделирования, а также теоретическим положениям.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ**

### **Издания из перечня ВАК для кандидатских диссертаций**

1. Хохлов, Ю.И. Внешние и энергетические характеристики двенадцатифазных компенсированных выпрямителей с векторным управлением / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, **П.В. Лонзингер** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2014. – Вып. 4. – № 14. – С. 37–45.

2. Хохлов, Ю.И. Внешние и энергетические характеристики компенсированных выпрямителей с векторным управлением / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, **П.В. Лонзингер** // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. № 1 (49). С. 95–100.

3. Хохлов, Ю.И. Экспериментальное исследование некомпенсированного выпрямителя с векторным управлением/ Ю.И. Хохлов, М.М. Дудкин, В.И. Сафонов, **П.В. Лонзингер**// Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2015. – Т. 15. – № 3. – С. 45–51.

#### Другие научные публикации

4. Электромагнитные процессы в компенсированных преобразователях с векторным управлением / Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, В.Д. Константинов, **П.В. Лонзингер** // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – [www.science-education.ru/117-13505](http://www.science-education.ru/117-13505).

5. Хохлов, Ю.И. Экспериментальное исследование двенадцатифазного компенсированного выпрямителя с векторным управлением/ Ю.И. Хохлов, М.А. Дзюба, В.И. Сафонов, **П.В. Лонзингер**// Фундаментальные исследования. – 2015. — № 4-0. – С. 140–144.

6. Хохлов Ю.И. Электромагнитные процессы в некомпенсированных выпрямителях с повышением фазности векторным управлением// Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, **П.В. Лонзингер**// Наука ЮУрГУ. Секции технических наук. Материалы 67-й научной конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. – 2015. – С. 935–941.

7. Хохлов Ю.И. Электромагнитные процессы и характеристики компенсированных выпрямителей с пятой и седьмой гармониками тока в конденсаторах и векторным управлением/ Ю.И. Хохлов, В.И. Сафонов, **П.В. Лонзингер**// Наука ЮУрГУ Материалы 68-й научной конференции. Министерство образования и науки Российской Федерации; Южно-Уральский государственный университет. – 2016. – С. 910–917.

8. Пат. 2563027 Российская Федерация МПК<sup>7</sup> Н 02 М 7/12. Способ управления многофазным выпрямительным агрегатом/ Хохлов Ю.И., Сафонов В.И., **Лонзингер П.В.**; заявитель и патентообладатель Южно-Уральский государственный университет. – № 2014118705/07; заявл. 07.05.2014; опубл. 20.09.2015. Бюл. 26. – 11с.

9. Хохлов Ю.И. Расчет Г-образных фильтров и электромагнитных процессов устройства векторного управления двенадцатифазным компенсированным выпрямителем/ Ю.И. Хохлов, **П.В. Лонзингер**// Евразийское научное объединение. – 2018. – Том. 1. – № 1(35). – С. 60–65.

10. Хохлов Ю.И. Компьютерное моделирование переходных процессов в двенадцатифазном компенсированном выпрямителе с векторным управлением/ Ю.И. Хохлов, **П.В. Лонзингер**// Евразийское научное объединение. – 2018. – Том. 1. – № 2(36). – С. 53–56.

Лонзингер Петр Владимирович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРОЦЕССЫ В КОМПЕНСИРОВАННЫХ  
ВЫПРЯМИТЕЛЯХ С ВЕКТОРНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.09.12 – «Силовая электроника»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать \_\_. \_\_. 2019. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_.

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.