

*На правах рукописи*



**ЛИСОВСКАЯ ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА**

**КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ПИТАЮЩЕЙ  
СЕТИ ПОСРЕДСТВОМ АКТИВНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ  
НАПРЯЖЕНИЯ**

**Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский политехнический университет»

**Научный руководитель:** **Маклаков Александр Сергеевич**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:** **Брованов Сергей Викторович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный  
технический университет», профессор  
кафедры «Электроника и Электротехника»,  
(г. Новосибирск)

**Шевырёв Юрий Вадимович**  
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ  
ВО «Национальный исследовательский техно-  
логический университет МИСиС», про-  
фессор кафедры «Энергетика и энергоэф-  
фективность горной промышленности», (г.  
Москва)

**Ведущая организация** ФГАОУ ВО «Уральский федеральный уни-  
верситет имени первого Президента России  
Б.Н. Ельцина», (г. Екатеринбург)

Защита состоится «15» марта 2024 г. в 12 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.324.05 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, Челябинская обл., г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, ауд. 233.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на официальном сайте <http://magtu.ru/>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.2.324.05  
канд. техн. наук, доцент



Одинцов Константин Эдуардович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Компенсация реактивной мощности (КРМ) – это преднамеренное включение ёмкостной или индуктивной электрической нагрузки в питающую сеть для стабилизации напряжения, обеспечения требуемого  $\cos(\varphi)$  и повышения пропускной способности по активной мощности системы электроснабжения. Развитие технологий КРМ позволяет решать научно-технические проблемы и повышать качество электроэнергетики и энергоэффективность различных электротехнических комплексов и систем.

Большинство современных электротехнических комплексов и систем с двунаправленным обменом электроэнергией содержат в своём составе активные выпрямители напряжения (АВН). Развитие энергосберегающих технологий в данных системах продолжает быть актуальным направлением. Этому свидетельствует значительное количество научных трудов, опубликованных за последние годы. Потенциал использования АВН в будущем также огромен, так как на данный момент не существует более совершенных решений, способных обеспечивать рекуперацию электроэнергии с требуемыми показателями качества электроэнергии и высоким КПД на уровне 95%.

Наиболее крупными промышленными потребителями электроэнергии являются реверсивные электроприводы переменного тока (РЭПТ) среднего напряжения (от 1,5 до 10 кВ). Они выполняются на базе преобразователей частоты, содержащие в своём составе трехуровневые АВН и автономные инверторы напряжения (АИН). Масштабное внедрение такие системы получили в нефтяной, газовой, металлургической, горной, морской, химической, цементной, бумажной, транспортной и других отраслях промышленности. Использование данных потребителей в составе распределенных интеллектуальных сетей электроснабжения предприятия позволит дополнительно оказывать положительное влияние на качество электроэнергии в точке общего подключения потребителей. Разработка способа КРМ в питающей сети посредством РЭПТ позволит снизить уровень реактивной мощности в точке общего подключения к питающей сети без применения дополнительных специализированных устройств.

АВН большой мощности широко применяются в автономных системах генерирования электрической энергии на основе солнечных батарей и ветроэнергетических систем. В данных электротехнических комплексах их называют сетевыми инверторами из-за их длительной работы в инверторном режиме на сеть. По своей конструкции и принципу работы сетевые инверторы идентичны АВН и могут обеспечивать генерирование и потребление реактивной мощности.

Одним из перспективных направлений развития АВН в распределенных интеллектуальных системах городского электроснабжения является разработка двунаправленных зарядных станций для заряда аккумуляторов электромобилей. Суммарная мощность всех зарядных станций может составлять десятки и сотни МВт в крупном мегаполисе. Централизованное управление данным потоком мощности может снизить дефицит электроэнергии в определённые часы работы системы электроснабжения.

Разработка и исследование режимов генерации и потребления реактивной мощности посредством АВН положительно отразится на научном уровне прикладных исследований, направленных на улучшение электромагнитной совместимости и энергоэффективности систем электроснабжения, включающих РЭПТ, зарядные станции, ветроэнергетические комплексы и солнечные электростанции. Исследования в данной области перспективны в настоящее время и в будущем из-за повсеместного применения энергосберегающих систем потребления и генерирования электрической энергии на основе систем силовой преобразовательной техники, а также ужесточения требований к энергосбережению, энергоэффективности и качеству напряжения. На этом основании, можно сделать вывод об актуальности рассматриваемого в рамках диссертационной работы исследования.

### **Степень разработанности**

Научные исследования проблем повышения энергоэффективности функционирования систем потребления и генерирования электрической энергии на основе силовых преобразователей в составе электротехнических комплексов и систем опубликованы во многих научных статьях. Большой вклад в развитие данного научного направления внесли авторы: С.М. Бакиров, И.А. Баранов, С.В. Брованов, А. В. Волков, Г.С. Зиновьев, А.Б. Лоскутов, Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, И.А. Пашкин, В.В. Севастьянов, Т.Р. Храмин, Р.Т. Шрейнер, А.О. Gonzalo, P. Pandit, J. Pontt, J. Rodriguez, R. Huerta и многие другие. Ниже рассмотрены некоторые научные результаты проведенных ранее исследований по тематике диссертационного исследования указанных выше авторов.

В работах проф. Gonzalo Alonso Orcajo представлены результаты промышленных испытаний КРМ в сети посредством главных РЭПТ чистовых прокатных клетей стана горячей прокатки, которые реализованы на основе синхронных двигателей (СД) и трёхуровневых преобразователей частоты (ПЧ) среднего напряжения 3,3 кВ. ПЧ имеют классическую структуру, включающую АВН и АИН. Авторы предложили использовать АВН не только с целью обеспечения потребления из питающей сети активной мощности для поддержания требуемого процесса прокатки, но и одновременно компенсировать часть реактивной мощности, потребляемую соседними нагрузками. С точки зрения практической значимости представленные в статьях решения понятны и, несомненно, могут быть рекомендованы для любых других подобных систем. В работах не рассмотрены подробно вопросы влияния АВН в режиме управления реактивной мощностью на генерирование высших гармоник, определение возможных ограничений по максимальному полному току и напряжению в звене постоянного тока. Эти вопросы требуют более глубокого теоретического анализа, чтобы распространить предложенные решения на аналогичные объекты.

В работах проф. Pandit P. была рассмотрена энергосистема экскаватора, где  $\text{tg}(\varphi)$  в точке балансовой принадлежности выбирался таким образом, чтобы обеспечивалось максимальное снижение флуктуации напряжения на высоковольтном вводе. Для достижения желаемого  $\text{tg}(\varphi)$  система высокомощного РЭПТ с помощью АВН компенсировала потребление реактивной мощности от нагрузок собственных нужд экскаватора. Следует отметить, что

этого удалось достичь при уровне напряжения в звене постоянного тока в два раза превышающем напряжение на вторичной обмотке трансформатора. Такое решение вызывает вопросы по условиям работы электродвигателя, так как высокое напряжение в звене постоянного тока неблагоприятно скажется на электромагнитных процессах со стороны АИН.

В работах проф. Брованова С.С. проанализированы электромагнитные процессы, происходящие в силовой цепи преобразователя трёхуровневой топологии с выделенной средней точкой конденсаторов звена постоянного тока в автономных системах генерирования электрической энергии. Было доказано, что при работе с  $\cos(\varphi)$  отличным от единицы незначительно повышается неравномерность распределения статических электрических потерь в полупроводниковых модулях трёхуровневого преобразователя и увеличивается разбалансировка напряжений в звене постоянного тока. Данные проблемы могут быть решены на этапе проектирования силовой схемы преобразователя путём охлаждения полупроводниковых ключей и использования программно-аппаратных средств выравнивания напряжений, в том числе применения балансных резисторов и специализированных алгоритмов ШИМ.

Таким образом, существующие результаты и уровень проводимых исследований в области компенсации реактивной мощности посредством активных выпрямителей не являются в достаточной степени изученными и опубликованными в отечественной и зарубежной литературе.

**Объектом исследования** является электротехническая система, состоящая из питающей сети, схемы подключения к питающей сети, АВН и выпрямительной нагрузки. **Предметом исследования** являются условия функционирования и параметры качества преобразованной электроэнергии АВН в режиме генерирования и потребления реактивной мощности.

**Целью диссертационной работы** являются исследование и разработка способа КРМ в питающей сети посредством генерирования и потребления реактивной мощности АВН.

**Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие задачи:**

1. Проведен патентно-литературный обзор наиболее распространённых схем подключения трёхуровневых АВН к питающей сети, способов программной широтно-импульсной модуляции (ПШИМ) с избирательным удалением гармоник (ИУГ) и существующих проблем обеспечения качества преобразуемой мощности.

2. Выполнен теоретический анализ принципа работы АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности. На его основе разработан способ управления АВН для генерации и потребления реактивной мощности в зависимости от уровня напряжения в звене постоянного тока, обеспечивающий постоянный коэффициент модуляции.

3. Разработаны математические модели в программе Matlab/Simulink для проведения исследований условий функционирования системы управления АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности, а также оценки показателей качества преобразуемой электроэнергии, учитывая алгоритмы ПШИМ с ИУГ и многопульсные схемы подключений к питающей сети.

4. Проведено математическое моделирование токов и напряжений АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности, выполнен анализ показателей индивидуальных индексов гармонических искажений и получены диапазоны значений коэффициента модуляции АВН с минимальным суммарным гармоническим искажением для различных алгоритмов ПШИМ с ИУГ.

5. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном оборудовании для проверки адекватности разработанных математических моделей и доказательства работоспособности предложенного способа управления АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработан способ управления АВН с ПШИМ с ИУГ, отличающийся от известных тем, что позволяет обеспечить генерирование или потребление реактивной мощности при постоянстве номинального коэффициента модуляции.

2. Разработана математическая модель системы «Питающая сеть – трёхуровневый АВН», отличающаяся от известных тем, что содержит систему управления реактивной мощностью, учитывает алгоритмы ПШИМ с ИУГ и многопульсные схемы подключения к питающей сети.

3. Разработан метод определения уровней индивидуальных гармоник спектров напряжений и токов АВН при ПШИМ и ИУГ на полном интервале изменения коэффициента модуляции.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что полученные научные результаты могут быть использованы для компенсации реактивной мощности в точке общего подключения к питающей сети различных электротехнических комплексов и систем электротранспорта, возобновляемых источников энергии, автономных систем генерирования и потребления электрической энергии. Развитие и исследование способов компенсации реактивной мощности в электротехнических системах положительно отразится на научном уровне прикладных исследований, направленных, прежде всего, на их разработку, обеспечение электромагнитной совместимости и энергоэффективности. Данное исследование способствует развитию и совершенствованию систем управления полупроводниковых преобразователей отечественного производства, что в будущем даст положительные экономические результаты в рамках политики импортозамещения.

**Методика проведения исследований.** Применяются известные методы теоретических и экспериментальных исследований. Научные результаты получены с помощью использования аналитических и численных методов решения нелинейных уравнений, тригонометрического ряда Фурье, логических операций, численного моделирования, теории автоматического управления. Разрабатываемые математические модели реализованы с использованием аппарата передаточных функций и структурного моделирования в математическом пакете Matlab/Simulink. Результаты экспериментальных исследований получены на лабораторном оборудовании.

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

1. Способ управления активным выпрямителем напряжения в режимах генерирования и потребления реактивной мощности для компенсации реактивной мощности в питающей сети, основанный на поддержании заданного коэффициента модуляции и регулировании напряжения в звене постоянного тока.

2. Метод определения уровней неудалённых гармоник спектров напряжений и токов активного выпрямителя напряжения при программная широтно-импульсной модуляции с избирательным удалением гармоник.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований режимов генерирования и потребления реактивной мощности трёхуровневого активного выпрямителя напряжения, а также спектров напряжений и токов при ПШИМ с ИУГ.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается: 1) актуальной научной проблемой; 2) применением общепринятых методов и подходов проведения исследования; 3) расхождением результатов расчетов с результатами экспериментальных исследований в пределах инженерной точности.

**Соответствие научной специальности.** Диссертационное исследование соответствует пунктам 1, 3, 4 паспорта научной специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных конференциях "Электротехнические комплексы и системы автоматизации в металлургии" (Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice) (PEAMI 2020 и 2023), г. Магнитогорск, Россия; научно-технических семинарах кафедры мехатроники и автоматизации ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» (2019–2022 г.г.); научно-техническом семинаре кафедры автоматики и управления ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет» (2023 г.).

В 2022–2023 гг. диссертационное исследование выполнялось в рамках Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук «Развитие и исследование метода управления силовыми преобразователями на основе предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых последовательно-последовательных полупроводниковых модулей» (МК-3803.2022.4).

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 11 статьях, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Минобрнауки России, 5 статей в изданиях, индексируемых в международных системах цитирования Scopus и WoS.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа содержит введение, 4 главы, заключение, список литературы из 144 наименований. Диссертация выполнена на 120 страницах машинописного текста, в том числе 69 рисунков и 6 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** раскрыта актуальность проводимого исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель работы, основные задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** выполнен обзор наиболее часто используемых схем подключения к питающей сети АВН; указаны их достоинства и недостатки, основные компоненты и характеристики; рассмотрен принцип генерации и потребления реактивной мощности АВН, и выполнен обзор проблем качества преобразованных токов и напряжений.

Для более эффективного использования преобразователей, снижения гармоник, уменьшения потерь в коммутационных приборах и повышения качества выходного напряжения используются многоуровневые топологии и многопульсные схемы подключения к питающей сети. Наиболее популярные 6-, 12- и 18-пульсные схемы представлены на рисунке 1.1.

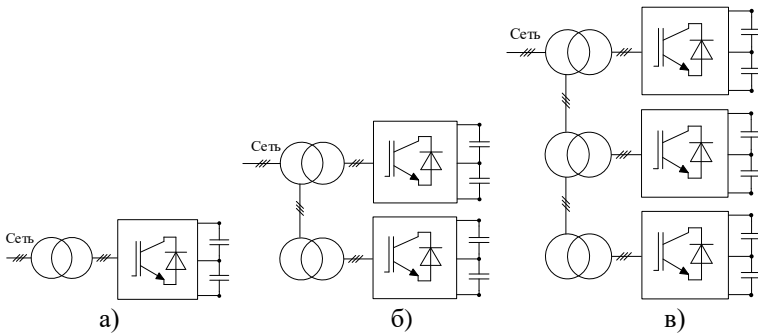


Рисунок 1.1 – Многопульсные схемы подключения:

а) 6-пульсная схема; б) 12-пульсная схема; в) 18-пульсная схема

В таблице 1.1 указаны основные технические данные рассмотренных в диссертации многопульсных схем подключения АВН к питающей сети.

Таблица 1.1 – Технические данные многопульсных схем подключения АВН к питающей сети

Схема подключения	Мощность, МВт	Мощность трансформаторов, МВА	Схемы соединения трансформаторов	Напряжения трансформаторов, кВ	Частота ПШИМ с ИУГ, Гц
6-пульсная	12	12	Y/Y	10/3,3	150–450
6-пульсная	14	14	$\Delta/\Delta$		
12-пульсная	14	14	Y-Y/Y- $\Delta$		
12-пульсная	14	14	Y/ $\Delta$ -Y		
18-пульсная	18	20	$\Delta/\Delta$ ; $\Delta/\Delta$ ; $\Delta/\Delta$		
18-пульсная	18	18	Y-Y-Y / $\Delta$ -Зигзаг-Зигзаг		



Выполнимость управления реактивной мощностью в питающей сети посредством активных выпрямителей проанализирована на основе однофазной схемы замещения, показанной на рисунке 1.2. На представленной схеме внутренняя ЭДС АВН  $E_{ABH}$  подключена через приведенное индуктивное сопротивление  $X_L$  и активное сопротивление  $R$  к ЭДС питающей сети  $E_c$ . Разность  $E_{ABH}$  и  $E_c$  приходится на  $R$  и  $X_L$ , падения напряжений на которых  $IR$  и  $U_L$ . Работа АВН во всех режимах показана с помощью векторных диаграмм на рисунке 1.2, где изображены векторы потребляемого из сети тока  $I_c$ , а также  $E_{ABH}$ ,  $E_c$ ,  $IR$  и  $U_L$ .

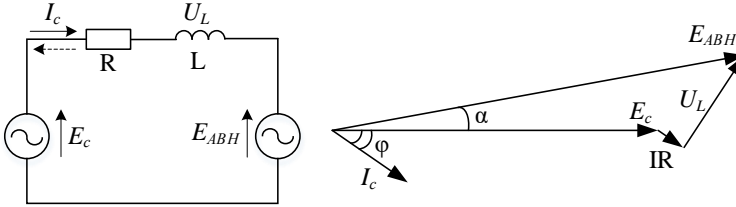


Рисунок 1.2 – Однофазная схема замещения АВН и векторная диаграмма

На основе анализа векторных диаграмм получены выражения для:

– активной мощности

$$P_c = E_c \cdot I_c \cdot \cos(\varphi) = \frac{E_c \cdot E_{ABH} \cdot (R \cdot \cos(\alpha) + X_L \cdot \sin(\alpha)) - E_c^2 \cdot R}{R^2 + X_L^2}, \quad (1.1)$$

– реактивной мощности

$$Q_c = E_c \cdot I_c \cdot \sin(\varphi) = \frac{E_c \cdot E_{ABH} \cdot (X_L \cdot \cos(\alpha) - R \cdot \sin(\alpha)) - E_c^2 \cdot X_L}{R^2 + X_L^2}, \quad (1.2)$$

– полной мощности

$$S_c = \sqrt{P_c + Q_c} = \sqrt{\frac{E_c^2 \cdot (E_{ABH}^2 - 2 \cdot E_c E_{ABH} \cdot \cos(\alpha) + E_c^2)}{R^2 + X_L^2}}. \quad (1.3)$$

Был проведен обзор исследований, посвящённых оценке поведения гармоник в спектрах напряжений и токов АВН при программной ШИМ для наиболее распространённых в области больших мощностей и низких частот переключений полупроводниковых модулей трёхуровневых форм сигналов. Было определено, что существующие результаты исследований не позволяют оценить поведение каждой отдельной неудалённой гармоники до 50-й (согласно международным стандартам качества электроэнергии) в спектрах напряжения и тока при работе преобразователя на полном диапазоне коэффициента модуляции.

**Во второй главе** разработаны дискретные и линеаризованные математические модели трёхуровневого АВН, учитывающие алгоритмы ПШИМ с ИУГ, а также проведен синтез системы автоматического регулирования то-

ков и выпрямленного напряжения АВН для режимов регулирования реактивной мощности. Предложены рекомендации по определению величины генерируемой реактивной мощности при учёте уровня напряжения в звене постоянного тока, выполнено математическое моделирование в программе Matlab/Simulink.

Принципиальная электрическая схема трёхуровневого АВН показана на рисунке 2.1. Трёхуровневая топология мостового преобразователя позволяет вывести нулевую точку постоянно тока, которая образуется между двумя эквивалентными ёмкостями  $C_{dc}/2$ . На каждой эквивалентной ёмкости напряжение делится поровну  $u_{dc}/2$ . Каждая фаза подключается к нулевому потенциалу через фиксированные диоды  $VD_{c1}-VD_{c6}$  и транзисторы  $VT_2-VT_3$ ,  $VT_6-VT_7$ ,  $VT_{10}-VT_{11}$ . Данная топология содержит двенадцать двунаправленных полупроводниковых модулей, каждый из которых включает управляемые ключи  $VT_1-VT_{12}$  и обратные диоды  $VD_1-VD_{12}$ . Питающая система напряжений и входное активно-индуктивное сопротивление принимаются симметричными:  $e_a + e_b + e_c = 0$  и  $Z_a = Z_b = Z_c$ .

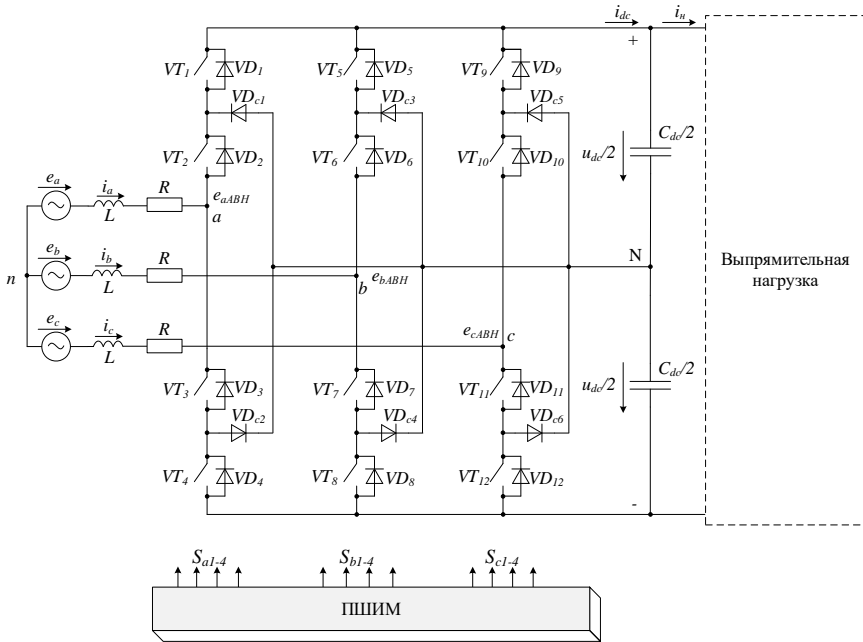


Рисунок 2.1 – Схема электрическая принципиальная трёхуровневого АВН

Схема структурная активного выпрямителя в системе координат  $[dq0]$  показана на рисунке 2.2, где  $e_d, e_q, e_{dABN}, e_{qABN}$  – напряжения в системе координат  $[dq0]$ ;  $i_d, i_q$  – токи в системе координат  $[dq0]$ ;  $f_d, f_q$  – коммутационные функции в системе координат  $[dq0]$ .

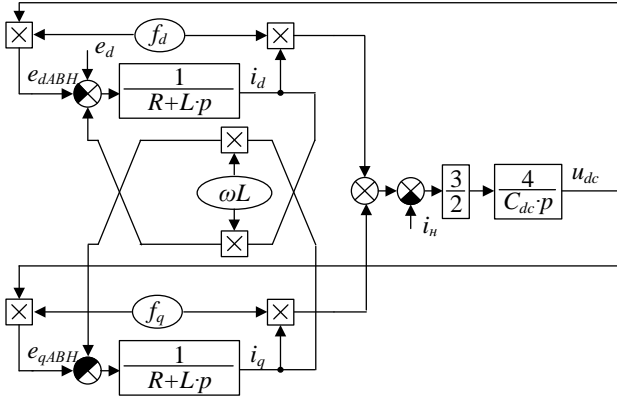


Рисунок 2.2 – Структурная схема АВН в системе координат  $[dq0]$

Управление потреблением или генерированием активной и реактивной мощностей в питающей сети возможно с помощью напряжения в звене постоянного тока, коэффициента модуляции и угла сдвига фаз между вектором напряжения АВН и напряжением сети. Было получено выражение, определяющее зависимость между необходимым уровнем напряжения звена постоянного тока  $U_{dc}$ , и реактивной мощностью в виде:

$$U_{dc} = \frac{(Q_c \cdot (R^2 + X_L^2) + E_c^2 \cdot X_L)}{(X_L \cdot \cos(\alpha) + R \cdot \sin(\alpha)) \cdot E_c \cdot m}. \quad (2.1)$$

С учётом принятых допущений (активное сопротивление во много раз меньше индуктивного и угол  $\alpha$  близок к 0), выражение (2.1) примет вид

$$U_{dc} = \frac{Q_c \cdot X_L + E_c^2}{E_c \cdot m}. \quad (2.2)$$

Выражение (2.2) позволяет рассчитать необходимое напряжение в звене постоянного тока АВН для генерации и потребления заданной реактивной мощности.

С увеличением тока  $i_d$  максимальное значение реактивной мощности будет снижаться. Это обусловлено тем, что максимальная потребляемая полная мощность преобразователя ограничена максимальной потребляемой активной мощностью выпрямительной нагрузки ( $S_{cmax} \approx P_{cmax}$ ). Ограничение по реактивной мощности определяется как

$$Q_c \leq \sqrt{S_{cmax}^2 - P_c^2}. \quad (2.3)$$

Данное ограничение в системе управления АВН выполнено с помощью зависимого токоограничения

$$i_q \leq \sqrt{i_{dmax}^2 - i_d^2}. \quad (2.4)$$

На рисунке 2.3 представлена схема функциональная системы управления активным выпрямителем для компенсации реактивной мощности. Локальный уровень управления АВН состоит из двух подчинённых контуров регулирования. Внутренний контур тока выполнен в системе координат  $[dq0]$ , ориентированной на фазное напряжение сети. Ток  $i_d$  обеспечивает управление напряжением звена постоянного тока. Ток  $i_q$  используется для управления реактивной мощностью. Выражение, определяющее зависимость  $U_{dc}$  от  $Q_c$  в системе координат  $[dq0]$ :

$$U_{dc} = \frac{\frac{4}{3} Q_c X_L + e_d^2}{e_d \cdot m} = \frac{2i_q X_L + e_d}{m}. \quad (2.5)$$

Появление  $i_q$  приведёт к возрастанию падения напряжения на индуктивном сопротивлении, следовательно, необходимо повышение выходного напряжения  $E_{ABH}$  на величину двойного падения напряжения  $2i_q X_L$ . Значения максимальной генерируемой реактивной мощности и реактивного тока могут быть определены при условии  $i_d = 0$ . Перспективен способ управления АВН с зависимым токоограничением для компенсации реактивной мощности в сети в составе интеллектуальных сетей электроснабжения. При реализации режимов компенсации реактивной мощности с верхнего уровня управления энергопотреблением формируется на нижний уровень регулирования АВН задание на генерацию или потребление реактивной мощности  $Q_z$ , как показано на рисунке 2.3. АВН работает параллельно с нелинейной нагрузкой в точке общего подключения потребителей. Направление возможного обмена реактивной мощностью показано стрелками. В качестве нелинейной нагрузки могут быть тиристорные преобразователи, циклоконвертеры, нерегулируемые асинхронные двигатели (АД), системы ПЧ-АД и др.

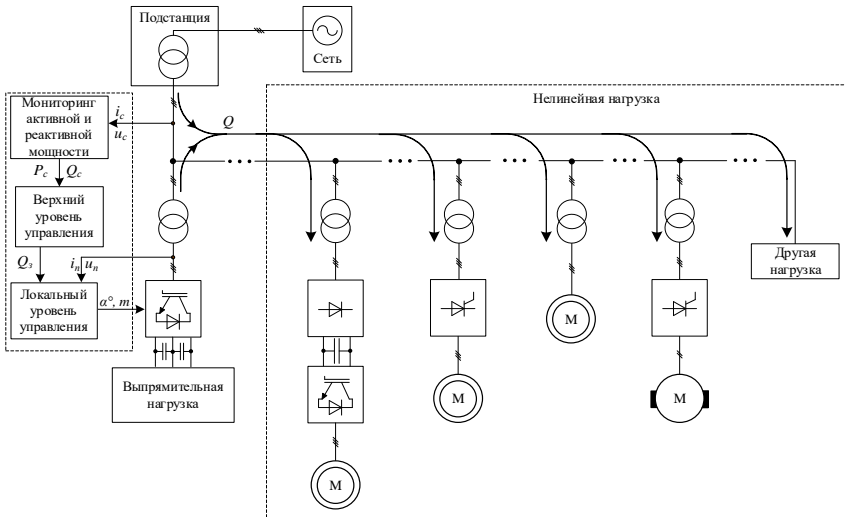


Рисунок 2.3 – Функциональная схема АВН для интеллектуальных сетей электроснабжения

**В третьей главе** исследовано поведение амплитуд гармоник напряжения и потребляемых токов трёхуровневого АВН на интервале изменения индекса модуляции от 0 до 1,15 при различных шаблонах ПШИМ с ИУГ. Предложены формулы расчёта спектров напряжений и токов трёхуровневого АВН для многопульсных схем подключения к питающей сети.

Известно, что качество преобразованной мощности силовыми полупроводниковыми преобразователями, в основном, определяется алгоритмом ШИМ. Анализ научной-технической литературы и экспериментальных данных, полученных на промышленных предприятиях, определил метод программной ШИМ (ПШИМ) с избирательным удалением гармоник (ИУГ) основным для трёхуровневых АВН большой мощности. ПШИМ работает эффективно на малой частоте коммутаций полупроводниковых модулей в составе многопульсных схем подключения к питающей сети. Переключение при ПШИМ осуществляется по заранее рассчитанным шаблонам переключений, выбираемых в зависимости от требуемого спектра напряжения преобразователя, из которого полностью исключают или подавляют наиболее негативно сказывающиеся на качестве тока гармоники. На рисунке 3.1 представлены последовательности углов переключений ПШИМ с ИУГ в диапазоне частот от 150 до 450 Гц, используемые для создания симметричной униполярной трёхуровневой формы напряжения АВН на интервале изменения индекса модуляции от 0 до 1,15.

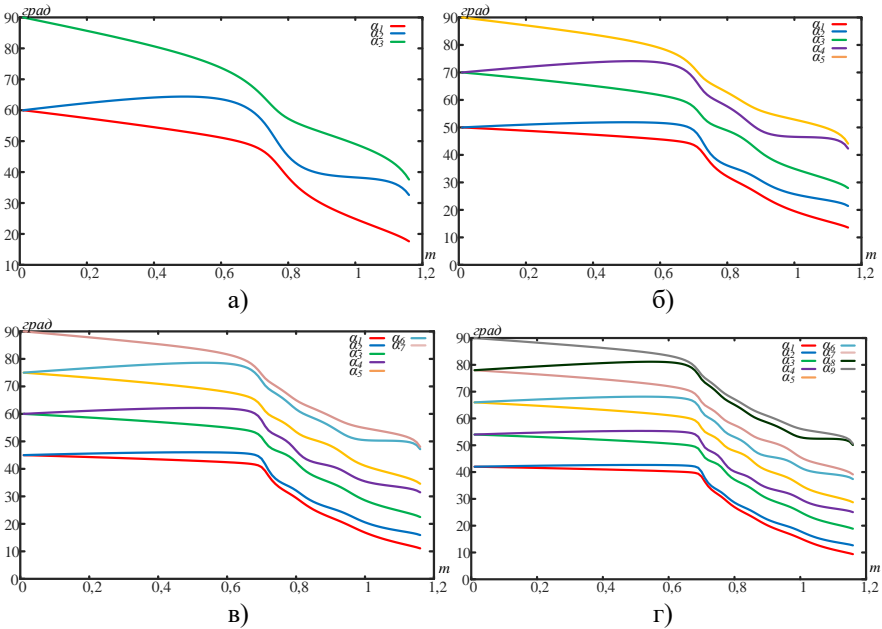


Рисунок 3.1 – Углы переключений ПШИМ ИУГ с исключением:  
а) 5, 7; б) 5, 7, 11, 13; в) 5, 7, 1, 13, 17, 19; г) 5, 7, 1, 13, 17, 19, 23, 25

Выражение для определения фазного напряжения преобразователя относительно нейтральной точки источника  $N$  запишем в виде

$$e_N(\omega t) = e_{a0}(\omega t) - \frac{1}{3} \sum_{j=a}^{b,c} e_{j0}(\omega t) = \sum_{n=1,5,7,\dots}^{\infty} \left( \frac{2U_{dc}}{n\pi} \left[ \sum_{k=1}^N (-1)^{k+1} \cos(n\alpha_k) \right] \sin(n\omega t) \right), (3.1)$$

где в силу симметрии напряжений исключаются гармоники кратные трём.

Амплитуда каждой гармоники рассчитывается согласно выражению

$$E_{Nhm\%} = \frac{2E_{Nhm}}{U_{dc}m} \cdot 100\% . (3.2)$$

На рисунке 3.2 представлены результаты рассчитанных амплитуд гармоник  $E_{Nhm\%}$  на интервале индекса модуляции от 0 до 1,15 с шагом 0,01 для полученных четырёх шаблонов ПШИМ с ИУГ.

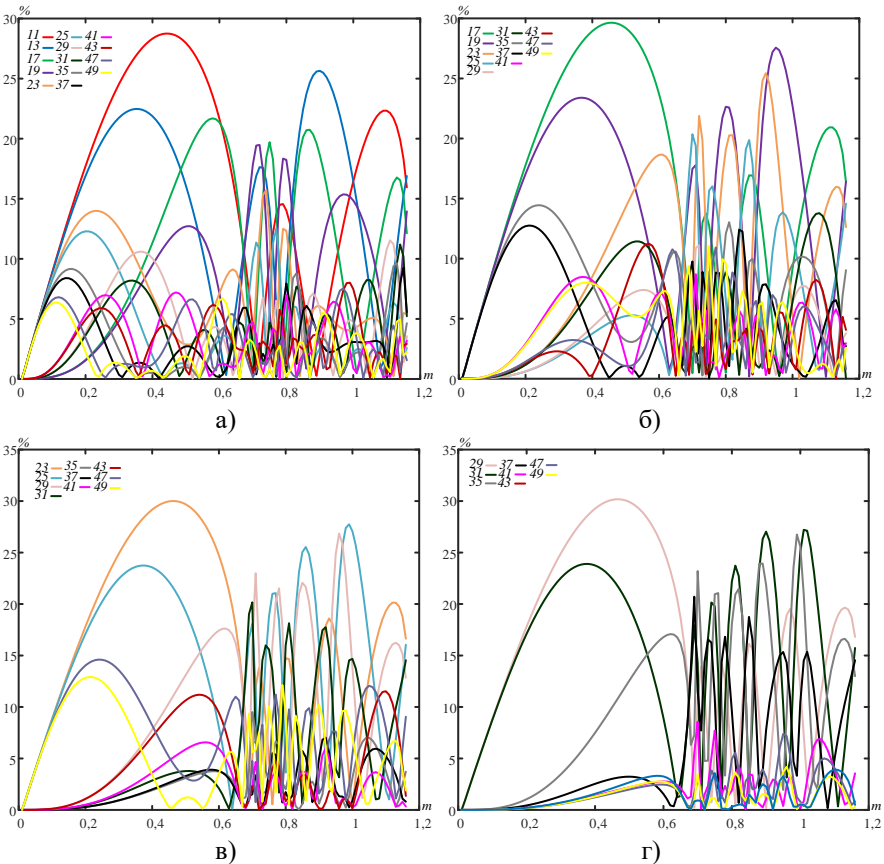


Рисунок 3.2 – Поведение неудалённых гармоник в спектрах напряжений трёхуровневого АВН при ПШИМ с ИУГ:

а) 5, 7, б) 5, 7, 11, 13, в) 5, 7, 1, 13, 17, 19, г) 5, 7, 1, 13, 17, 19, 23, 25

Коэффициенты суммарных гармонических искажений  $THD_{50\%}$  фазного напряжения трёхуровневого АВН рассчитывались по выражению

$$THD_{\%} = \sqrt{\sum_{n=5}^{50} E_{Nhm\%}^2} . \quad (3.3)$$

На рисунке 3.3 показана зависимость  $THD_{\%}$  выходного напряжения АВН от коэффициента модуляции, где видно, что для рассматриваемых шаблонов ПШИМ с ИУГ показатели  $THD_{\%}$  имеют плавный нисходящий тренд в пределах индекса модуляции от 0 до 0,65. В диапазоне изменения индекса модуляции от 0,65 до 1,15 (укрупненно показано на рисунке 3.3 справа) значения  $THD_{\%}$  напряжения АВН имеют нелинейный характер. Наглядно видно, что разница  $THD_{\%}$  может превышать 20% при коэффициентах модуляции от 0,65 до 1,15.

Характерно следующее, минимальные значения  $THD_{\%}$  для рассмотренных ПШИМ с ИУГ находятся в диапазоне коэффициента модуляции от 1,03 до 1,11. Таким образом, повышение частоты коммутации ключей преобразователя с ПШИМ с целью избирательного удаления большего числа гармоник не приводит к существенному улучшению качества преобразованного напряжения для всех коэффициентов модуляции.

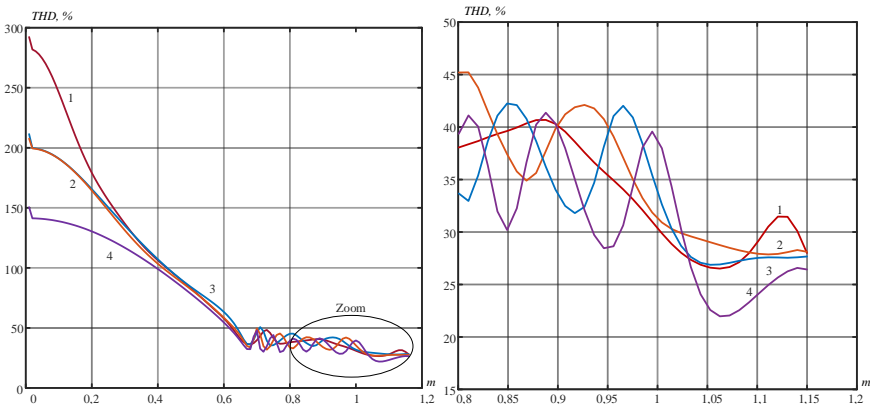


Рисунок 3.3 – Поведение  $THD_{\%}$  фазного напряжения трёхуровневого АВН в зависимости от индекса модуляции для четырёх шаблонов ПШИМ

Для расчёта гармоник тока используется эквивалентная однофазная схема замещения, включающая эквивалентное индуктивное сопротивление участка цепи  $X_h$

$$I_{hm} = \frac{U_{Nhm} - E_{Nhm}}{X_h} , \quad (3.4)$$

где  $h$  – порядковый номер гармоники 1, 5, 7, ...;  $X_h$  – индуктивное сопротивление участка цепи для  $h$ -й гармоники.

Первая гармоника тока определяется по формуле

$$I_{1m} = \frac{U_{N1m} - E_{N1m}}{X_h} . \quad (3.5)$$

Принимая допущение, что напряжение источника  $U_{Nhm}$  не содержит высших гармоник, а  $X_h = h\omega L$ , тогда гармоники тока можно рассчитать в % относительно амплитуды гармоники фазного напряжения трёхуровневого преобразователя по формуле

$$I_{hm\%} = \frac{E_{Nhm\%}}{h\omega L}, \quad (3.6)$$

где  $h$  – порядковый номер гармоники 5, 7, ....

**В четвёртой главе** представлены результаты натурных исследований на лабораторном оборудовании, которые показали, что теоретические и экспериментальные результаты различаются в пределах инженерной точности.

Исследования выполнялись в лаборатории силовой преобразовательной техники. Обобщенная схема состава аппаратных и программных средств исследовательского стенда представлена на рисунке 4.1. Задачи управления преобразователем распределяются между DSP и FPGA. FPGA выполняет функции по контролю за правильным распределением импульсов управления IGBT, а DSP обрабатывает программу системы управления преобразователем. В качестве вычислительного ядра DSP используется 32 битный процессор Texas Instruments TMS320C28346 с тактовой частотой 300 МГц, имеющий 256 МБ NOR-флэш-памяти, 2 МБ оперативной памяти, 300 MIPS (с плавающей запятой). Подготовка программного кода для платформы управления выполнялась в среде Matlab/Simulink. Для снятия осциллограмм и измерения мгновенных значений напряжений на входе трёхуровневого преобразователя использовалось графическое программное обеспечение на базе Windows™ платформы управления BoomBox.

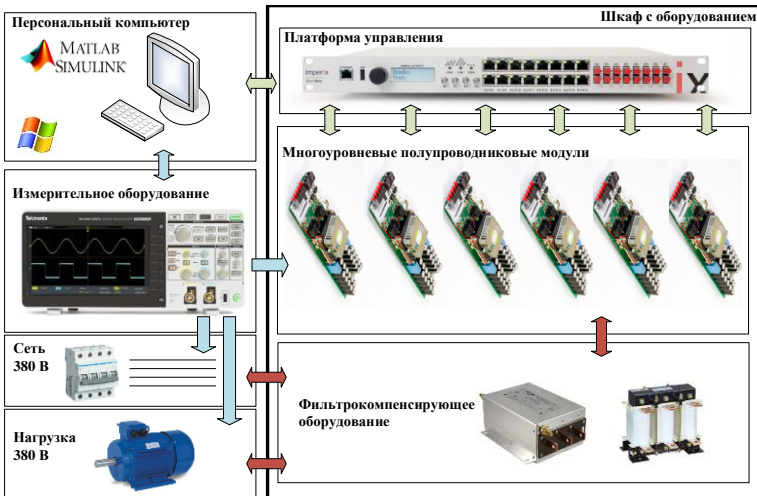


Рисунок 4.1 – Лабораторная установка

Главной целью проводимого эксперимента являлась верификация математической модели системы управления трёхуровневого АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности. В программе блочного



визуального программирования Matlab/Simulink с помощью библиотеки Iprexig (для программирования платформы управления BoomBox) был разработан программный код системы управления трёхуровневым АВН.

Производилось сравнение результатов моделирования и данных с микроконтроллера. Математическая модель является адекватной, разница результатов при сравнении не превышает инженерной точности. Ниже на рисунке 4.2 представлены сравнительные результаты, полученные с помощью экспериментальных исследований и моделирования режимов работы АВН. Отклонение расчётных данных от экспериментальных составляет менее 6%.

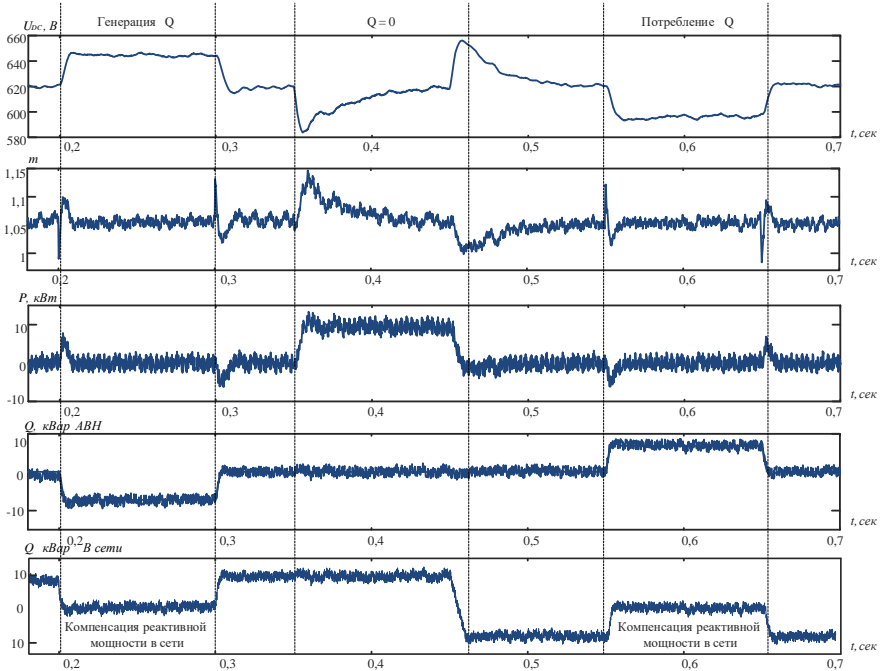


Рисунок 4.2 – Верификация настройки системы управления АВН в режиме потребления и генерирования реактивной мощности для компенсации реактивной мощности в питающей сети

В момент времени 0,2 сек поступает задание на компенсацию реактивной мощности в питающей сети 9 кВар (см. рисунок 4.2). В этот момент коэффициент модуляции АВН отклоняется от номинального значения, и до момента времени 0,22 сек происходит переходный процесс обработки системы управления по управляющему сигналу; напряжение в звене постоянного тока повышается на 4% от номинального значения. Индекс модуляции поддерживается на номинальном уровне. На рисунке 4.2 при  $t = 0,3$  сек АВН получает управляющий сигнал на завершение режима компенсации реактивной мощности, происходит переходный процесс обработки системы регулирования АВН в исходной состоянии, соответствующее режиму работы без нагрузки. В период времени от 0,35 сек до 0,45 сек АВН работает в режиме выпрямления с по-

треблением номинальной активной мощности 10 кВт. В период времени от 0,55 сек до 0,65 сек АВН переходит в режим компенсации реактивной мощности 9 кВАР при сниженном на 4% напряжении в звене постоянного тока от номинального значения. Оба режима являются аналогичными режимам СТАТКОМа, но отличаются тем, что компенсация реактивной мощности в питающей сети происходит не с помощью регулирования коэффициента модуляции, а путём изменения напряжения в звене постоянного тока.

Следующий этап экспериментальных исследований заключался в проверке работоспособности метода расчёта спектров тока трёхуровневого АВН, приведенной в Главе 3. На рисунке 4.3 показаны результаты сравнения гармоник тока в зависимости от коэффициента модуляции, полученные с помощью моделирования и посредством натуральных экспериментов.

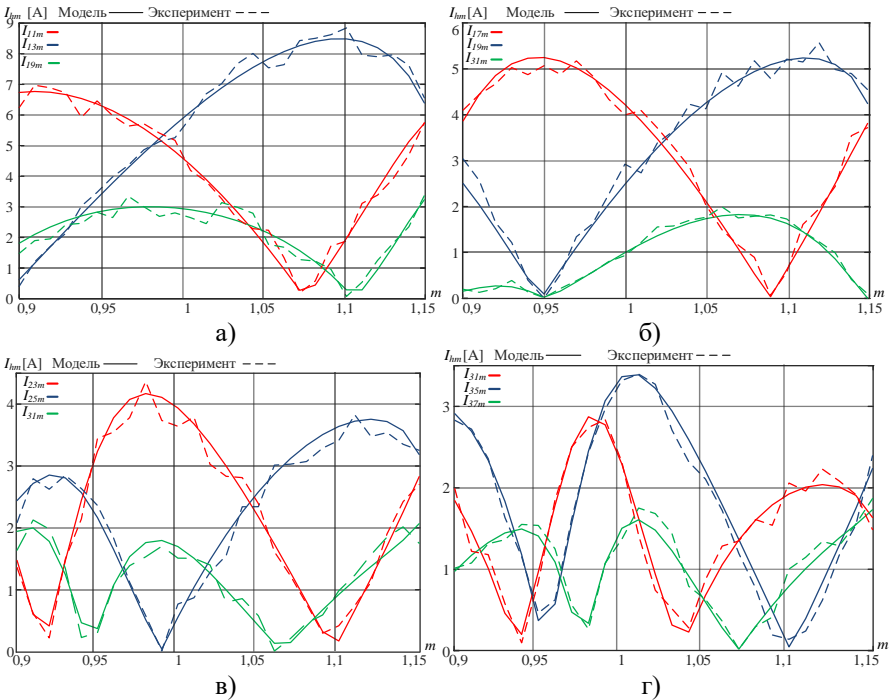


Рисунок 4.3 – Результаты сравнения рассчитанных и измеренных экспериментально гармоник тока в зависимости от коэффициента модуляции для четырёх ПШИМ с ИУГ: а) 5, 7; б) 5, 7, 11, 13; в) 5, 7, 1, 13, 17, 19; г) 5, 7, 1, 13, 17, 19, 23, 25

Результаты сравнительного анализа измеренных амплитуд потребляемого тока трёхуровневого АВН показали хорошую сходимость. Как видно из рисунка 4.3, ошибка составляет не более 6%. Таким образом, это доказывает возможность использовать предложенные в Главе 3 метода и разработанные математические модели для определения спектров напряжений и токов трёхуровневого АВН.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор схем подключения АВН к питающей сети определил наличие шестипульсных, двенадцатипульсных и восемнадцатипульсных вариантов решений на основе многообмоточных фазосдвигающих трансформаторов и отдельных трансформаторов со сдвигом вторичных обмоток. Существующие проблемы обеспечения качества преобразуемой мощности АВН связаны с низкой частотой переключений полупроводниковых модулей АВН, а также наличием высших неударённых гармоник в кривой выходного напряжения. Обзор специализированных способов ШИМ для АВН определил основным методом ПШИМ с ИУГ.

2. Разработан способ управления активным выпрямителем напряжения, с помощью которого можно регулировать уровень напряжения в звене постоянного тока в зависимости от заданной реактивной мощности и коэффициента модуляции. Разработанный способ позволяет осуществить компенсацию реактивной мощности при постоянном номинальном коэффициенте модуляции ПШИМ с ИУГ.

3. Разработана математическая модель системы управления АВН для исследования режимов генерирования и потребления реактивной мощности в программе Matlab/Simulink, учитывающая трехуровневую топологию преобразователя, схему подключения к сети и алгоритмы ПШИМ с ИУГ. Математическая модель позволяет проводить оценку качества системы автоматического регулирования, уровней индивидуальных и суммарных гармонических составляющих токов и напряжений.

4. Результаты моделирования электромагнитных процессов в системе «Питающая сеть – трёхуровневый АВН» показали наиболее благоприятный диапазон значений коэффициента модуляции АВН от 1,05 до 1,1 по отношению к уровню суммарных гармонических искажений при различных алгоритмах ПШИМ с ИУГ.

5. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном исследовательском стенде для проверки адекватности разработанного способа управления АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности. Полученные экспериментальные результаты продемонстрировали компенсацию реактивной мощности на уровне 9 кВар, обеспечив при этом сходимость в пределах инженерной точности измеренных токов и напряжений АВН с результатами моделирования.

6. Проведены экспериментальные исследования на лабораторном исследовательском стенде для проверки адекватности метода расчета индивидуальных и суммарных гармонических составляющих токов и напряжений трёхуровневого АВН с ПШИМ с ИУГ. Полученные экспериментальные результаты подтвердили адекватность и работоспособность разработанного метода.

7. Полученные результаты могут быть рекомендованы к применению в системах рекуперативного электропривода большой мощности, автономных системах потребления и генерирования электрической энергии с целью повышения эффективности и улучшения качества преобразованной электроэнергии.

### Научные публикации по теме диссертации:

#### *Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Маклаков, А.С. Сравнительный анализ спектров тока в многопульсных схемах подключения к питающей сети трёхуровневых активных выпрямителей напряжения с предварительно запрограммированной широтно-импульсной модуляцией / А.С. Маклаков, А.А. Радионов, А.А. Николаев, **Т.А. Лисовская** // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2022. – Т. 65, № 4. – С.44-49.
2. Маклаков, А.С. Возможности компенсации реактивной мощности в сети посредством высокомоощного рекуперативного электропривода переменного тока / А.С. Маклаков, А.А. Николаев, С.А. Линьков, **Т.А. Лисовская** // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18, № 3-4. – С. 65-74.
3. Маклаков, А.С. Исследование спектров тока 18-пульсной схемы подключения трёхуровневых активных выпрямителей / А.С. Маклаков, **Т.А. Лисовская**, Т. Цзин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2022. – № 44. – С. 25-44.

#### *Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus:*

4. Lisovskaya, T.A. Reactive Power Compensation based on Active Front-End Rectifiers / **Т.А. Lisovskaya**, A.S. Maklakov // in Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, Sept. – 2023. – P. 197-200.
5. Maklakov, A.S. Finding the best programmable PWM pattern for three-level active front-ends at 18-pulse connection / A.S. Maklakov, T. Jing, A.A. Radionov, V.R. Gasiyarov, **Т.А. Lisovskaya** // Machines. – 2021. – vol. 9. – № 7. – 127.
6. Maklakov, A.S. Control over Grid Reactive Power by Using a Powerful Regenerative Controlled-Speed Synchronous Motor Drive / A.S. Maklakov, A.A. Nikolaev, **Т.А. Lisovskaya** // Designs. – 2023. – Vol. 7. – No 3. – 62.
7. **Lisovskaya, T.A.** Linearization small deviation model of active front end rectifier / **Т.А. Lisovskaya**, A.S. Maklakov, R.A. Lisovsky, T. Jing // in Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, Sept. – 2020. – P. 133-136.
8. Jing, T. Comparative Analysis of the SHEPWM and SHMPWM Techniques for the Three-Level NPC Inverter based on the THD of Voltage and Current / T. Jing, A.S. Maklakov, A.A. Radionov, **Т.А. Lisovskay** // in Proc. Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice, Sept. – 2020. – P. 113-118.

#### *Публикации в изданиях, входящих в систему цитирования РИНЦ:*

9. Маклаков, А.С. Сравнительный анализ THD токов и напряжений трёхуровневого активного выпрямителя с различными последовательностями ПЗШИМ / А.С. Маклаков, Т. Цзин, **Т.А. Лисовская** // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2022. – Т. 9. – № 3. – С. 33-41.
10. Маклаков, А.С. Компенсация реактивности мощности в питающей сети посредством активных выпрямителей напряжения / А.С. Маклаков, А.А. Радионов, **Т.А. Лисовская** // Современные достижения университетских научных школ : Сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 23–24 ноября 2023 года. Том Выпуск 8. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 63-68.
11. Маклаков, А.С. Исследование поведения неударенных гармоник в спектре напряжения трёхуровневого преобразователя с программной ШИМ / А.С. Маклаков, А.А. Николаев, **Т.А. Лисовская** // Современные достижения университетских научных школ : Сборник докладов национальной научной школы-конференции, Магнитогорск, 23–24 ноября 2023 года. Том Выпуск 8. – Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, 2023. – С. 42-47.