

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.324.05,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МАГНИТОГОРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.И. НОСОВА»,
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 15.03.2024 № 2

О присуждении Лисовской Татьяне Александровне, гражданке Российской Федерации, учёной степени кандидата технических наук.

Диссертация «Компенсация реактивной мощности в питающей сети посредством активных выпрямителей напряжения» по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы принята к защите 28 декабря 2023 г. (протокол №7) диссертационным советом 24.2.324.05, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, приказ № 508/нк от 24.03.2023 г.

Соискатель Лисовская Татьяна Александровна, 02.12.1992 года рождения. В 2017 году соискатель окончила магистратуру в ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по направлению 27.04.04 «Управление в технических системах». В 2021 году окончила аспирантуру ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по направлению 13.06.01 Электро- и теплотехника.

Работает в должности программиста в Обществе с ограниченной ответственностью Научно-производственное предприятие «Учтех-Профи».

Диссертация «Компенсация реактивной мощности в питающей сети посредством активных выпрямителей напряжения» выполнена на кафедре «Автоматика и управление» ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Министерство науки и высшего образования РФ.

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Маклаков Александр Сергеевич, доцент центра проектной деятельности сектора научной деятельности ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет».

Официальные оппоненты:

1. Брованов Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, кафедра «Электроника и электротехника» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», (г. Новосибирск), профессор;

2. Шевырёв Юрий Вадимович – доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», кафедра «Энергетика и энергоэффективность горной промышленности», профессор.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация - ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, в своем положительном отзыве, подписанным Костылевым Алексеем Васильевичем, кандидатом технических наук, доцентом, заведующим кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок», указала, что диссертация Лисовской Татьяны Александровны «Компенсация реактивной мощности в питающей сети посредством активных выпрямителей напряжения» соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям в соответствии с «Положением о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 г. № 842, а её автор, Лисовская Татьяна Александровна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы.

Соискатель имеет 23 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 11 работ, из них 3 в журналах из перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованного ВАК, 5 публикаций, входящих в систему цитирования Scopus. Общий объем публикаций составляет 13,25 печатных листов. Сведения об опубликованных работах достоверны.

Авторский вклад соискателя заключается в следующем: получены результаты исследования работы активного выпрямителя напряжения в условиях генерирования и потребления реактивной мощности при использовании многопульсных схем подключения к питающей сети в совокупности с предварительно запрограммированным алгоритмом широтно-импульсной модуляции (ШИМ); получены результаты о наиболее эффективных последовательностях переключений полупроводниковых модулей трёхуровневого активного выпрямителя напряжения для шестипульсных, двенадцатипульсных и восемнадцатипульсных схем подключений к питающей сети в условиях низкой частоты переключений; оценено влияние на суммарные индексы гармонических искажений тока и напряжения предварительно запрограммированных широтно-импульсно модулируемых последовательностей переключений с удалением наиболее значимых гармоник; выполнен сравнительный анализ влияния каждой в отдельности неудалённой гармоники при изменении коэффициента модуляции преобразователя трёхуровневой и двухуровневой топологий для различных последовательностей переключений полупроводниковых модулей.

Наиболее значимые работы по теме диссертации:

1. 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.

2. Maklakov, A.S. Control over Grid Reactive Power by Using a Powerful Regenerative Controlled-Speed Synchronous Motor Drive / A.S. Maklakov, A.A. Nikolaev, **T.A. Lisovskaya** // Designs. – 2023. – Vol. 7. – No 3. – 62.

3. 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.

На диссертацию и автореферат поступило 7 отзывов, все положительные:

1. Отзыв ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», высшая инженерно-техническая школа, научно-производственный центр «Прецизионная электромеханика», г. Санкт-Петербург (к.т.н., доцент В.А. Томасов): 1) Почему был выбран метод программной ШИМ именно с избирательным подавлением гармоник (ПШИМ с ИУГ)? 2) В тексте автореферата наглядно представлены углы переключения ПШИМ с ИУГ, но желательно было бы знать – при каких начальных условиях они были получены?

2. Отзыв ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева», г. Нижний Новгород (д.т.н., профессор О.В. Федоров): 1) Как было выбрано предельное значение коэффициента модуляции активного выпрямителя? 2) Почему не рассмотрена одновременная компенсация реактивной мощности при потреблении активной? 3) К сожалению, вопросы синтеза регуляторов остались за рамками автореферата.

3. ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова», г. Новочеркасск (д.т.н., профессор Лобов Б.Н., к.т.н., доцент Микитинский А.П.) 1) В статье не рассматривается вопрос качества электроэнергии. Известно, что проблема гармоник в сети весьма серьезна из-за ШИМ. На мой взгляд, режимы компенсации реактивной мощности могут ухудшить спектр сетевого напряжения. 2) Можем ли мы увеличить мощность АВН, чтобы контролировать реактивную мощность сети в более широком диапазоне? 3) Автор кратко отразил полученные результаты, следовало привести больше текстового описания графиков и схем.

4. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа (д.т.н., доцент Р.Р. Саттаров): 1) На странице 9, в формуле (1.3) имеется опечатка (должно быть $S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2}$). Также можно было бы существенно сократить представление общеизвестных выражений (1.1) – (1.3).; 2) На странице 14, рисунок 3.2 имеет неудачный масштаб, так что затрудняется его чтение (при $m > 0.8$). Также представленный анализ необходимо было бы расширить и пояснить важность исключения гармоник высших порядков (более 15); 3) В автореферате не сформулирован в явном виде ответ на практически важный вопрос: Возможно ли применение метода компенсации реактивной мощности в системах ПЧ-АД и ПЧ-СД с активными выпрямителями?

5. Отзыв ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», г. Краснодар, (д.т.н., профессор Тропин В.В.). 1) На рисунке 2.2 динамические параметры звеньев указаны в основном в операторной форме с оператором « p », а между умножителями структурной схемы реактивно сопротивление задаётся почему-то в частотной форме.

6. Отзыв ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа (к.т.н. Максудов Д.В.) 1) Опечатка в формуле (1.3) – под корнем должны суммироваться квадраты мощностей P и Q .

7. Отзыв ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк (д.т.н., профессор Мещеряков В.Н.): 1) В автореферате не отражены особенности функционирования схемы управления АВН в системе координат $[dq0]$; 2) В автореферате не приводится подробного описания функциональной схемы АВН для интеллектуальных сетей электроснабжения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается широкой известностью их научных достижений в области силовой электроники, преобразовательной техники, электроприводов с активными выпрямителями, использующимися для улучшения режимов работы и снижения их влияния на качество электрической энергии. Профессор, д-р техн. наук Брованов С.В. является специалистом в области силовой электроники. Доцент, д-р техн. наук Ю.В. Шевырёв – признанный специалист в области автоматизированного элект-

тропровода и в вопросах повышения качества электроэнергии при работе полупроводниковых преобразователей.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана математическая модель системы управления трёхуровневым активным выпрямителем напряжения для исследования режимов генерирования и потребления реактивной мощности;

предложен оригинальный способ управления АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности, обеспечивающий постоянство номинального значения коэффициента модуляции при изменении уровня напряжения в звене постоянного тока на величину двойного падения напряжения на входном реактивном сопротивлении;

доказана экспериментальными результатами работоспособность системы управления активным выпрямителем напряжения в условиях генерирования и потребления реактивной мощности и алгоритмов программной ШИМ с избирательным удалением гармоник на лабораторном оборудовании;

введены новые рекомендации по использованию режимов генерирования и потребления реактивной мощности активными выпрямителями напряжения в составе электрических сетей.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что: доказана эффективность предложенной методики расчёта амплитуд неудалённых гармоник и суммарных гармонических составляющих токов и напряжений полупроводникового преобразователя при программной реализации ШИМ с избирательным удалением гармоник;

применительно к проблематике диссертации эффективно использованы методы математического моделирования и экспериментальных исследований, выполненных в лабораторных условиях;

изложена идея компенсации реактивной мощности в питающей сети посредством активных выпрямителей напряжения, в основе которой предложено регулирование напряжения в звене постоянного АВН на величину двойного падения напряжения на входном индуктивном сопротивлении для поддержания

заданного коэффициента модуляции;

раскрыты: зависимости уровней неудалённых гармоник в спектрах напряжения трёхуровневого активного выпрямителя напряжения в зависимости от коэффициента модуляции для различных шаблонов программной ШИМ с избирательным удалением гармоник;

изучено влияние коэффициента модуляции программной ШИМ с избирательным удалением гармоник на генерируемые уровни неудалённых гармоник внутренней ЭДС и тока трёхуровневого активного выпрямителя напряжения;

проведена модернизация существующих систем управления активных выпрямителей напряжения путём использования режимов генерирования и потребления реактивной мощности;

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены: усовершенствованная система управления трёхуровневым активным выпрямителем напряжения, обеспечивающая компенсацию реактивной мощности в питающей сети за счёт регулирования амплитуды и фазы выходного напряжения относительно напряжения сети при постоянстве коэффициента модуляции;

определены: перспективы использования результатов исследования для эксплуатации и проектирования активных выпрямителей напряжения, в частности, в области ветроэнергетических комплексов, электроприводов металлургических прокатных станков и двунаправленных станций быстрой зарядки аккумуляторов электромобилей;

создана методика расчета индивидуальных и суммарных гармонических составляющих токов и напряжений активного выпрямителя с программной ШИМ при избирательном удалении гармоник. Методика позволяет исследовать поведение неудалённых гармоник в спектре тока трёхуровневого активного выпрямителя напряжения в зависимости от коэффициента модуляции;

представлены: рекомендации по настройке систем управления и алгоритмов ШИМ активного выпрямителя напряжения при обеспечении генерирования и потребления реактивной мощности;

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

сходимость в пределах инженерной точности измеренных токов и напряжений АВН на лабораторном исследовательском стенде с результатами моделирования в режимах компенсации реактивной мощности;

теория построена на известных проверяемых результатах, в том числе для полученных спектров напряжений на входе активного выпрямителя напряжения, и согласуется с опубликованными данными, представленными в работах российских и зарубежных ученых;

идея базируется на анализе существующих решений по разработке методов и средств повышения эффективности функционирования полупроводниковых преобразователей в составе электротехнических комплексов и систем;

выполнено сравнение экспериментальных лабораторных результатов исследований, полученных автором, с результатами, представленными в патентных и литературных источниках, посвященных вопросам компенсации реактивной мощности активными выпрямителями напряжения и исследования качества преобразованной электроэнергии;

установлено качественное и количественное совпадение результатов моделирования и натурных испытаний работы активного выпрямителя напряжения в режиме компенсации реактивной мощности;

использованы современные методы имитационного моделирования с применением математического пакета Matlab/Simulink и лабораторного оборудования фирмы Imperix.

Личный вклад соискателя состоит в:

- разработке способа управления активным выпрямителем напряжения, отличающийся от известных тем, что позволяет обеспечить генерирование или потребление реактивной мощности при постоянстве заданного коэффициента модуляции с помощью изменения напряжения в звене постоянного тока на величину двойного падения напряжения на входном индуктивном сопротивлении;
- разработке математической модели системы «Питающая сеть – трёхуровневый активный выпрямитель», отличающаяся от известных тем, что содержит систему управления реактивной мощностью, учитывает алгоритмы программной

ШИМ с избирательным удалением гармоник и многопульсные схемы подключения к питающей сети;

– разработке метода определения уровней неудалённых гармоник спектров напряжений и токов активного выпрямителя при программной ШИМ с избирательным удалением гармоник на полном интервале изменения коэффициента модуляции.

В ходе защиты диссертации были высказаны следующие критические замечания:

В отзыве ведущей организации:

1. В работе не показано, каким образом автор учитывает схему подключения к питающей сети, частоту переключения полупроводниковых модулей, параметры энергосистемы при расчете параметров регуляторов системы управления активным выпрямителем.

2. Является ли универсальным предложенный метод расчёта неудаённых гармоник тока и напряжения трёхуровневого активного выпрямителя при программной ШИМ? Если да, то каким образом возможна его адаптация под другие топологии?

3. В работе не приведены примеры практического использования предложенного способа компенсации реактивной мощности.

4. Представленная автором в четвёртой главе схема математической модели объекта исследования не имеет должного описания.

5. Чем обосновано применение метода линеаризации «в малом» при описании существенно нелинейного объекта, каковым является активный выпрямитель напряжения?

6. Почему не использовались методы «технической линеаризации» при синтезе системы управления активным выпрямителем напряжения?

В отзыве официального оппонента Брованова С.В.:

1. На стр. 31 представлена система уравнений (2.4), в которых содержатся дискретные логические функции. Очевидно, уравнения данной системы должны содержать три дискретные функции f_a , f_b , f_c , а не одну f_a .

2. На стр. 34 в выражении (2.10) активная и реактивная мощность должны быть возведены в квадрат.

3. На стр. 36 приводится определение коэффициента модуляции как отношение выходной внутренней фазной ЭДС трехфазного мостового АВН к напряжению звена постоянного тока. Однако внутренняя ЭДС АВН содержит спектр гармонических составляющих, поэтому правильнее было бы говорить об отношении первой гармоники внутренней фазной ЭДС к напряжению звена постоянного тока.

4. В третьей главе автор приводит расчет и анализ гармоник фазного напряжения и тока при исключении из их спектров некоторых гармонических составляющих. Однако не понятно, как данный материал соотносится с целью и задачами диссертационного исследования по компенсации реактивной мощности.

5. В диссертации нет определений таких показателей и терминов, как: «номинальный коэффициент модуляции», «суммарное гармоническое искажение», «показателей суммарных индексов гармонических искажений».

6. По тексту диссертации имеются опечатки, такие как: стр. 7 в задаче №2– ... «на его основе разработана способ»...; стр. 10, третий абзац – ...«при программная широтно-импульсной модуляции»...; стр. 36, второй абзац – «Таким образом, напряжение в звене U_{dc} *быть* выше»...

В отзыве официального оппонента Шевырёва Ю.В.:

1. В работе недостаточно подробно представлено описание способа управления АВН в режимах генерирования и потребления реактивной мощности, при котором обеспечивается постоянство номинального значения коэффициента модуляции и регулирование уровня напряжения в звене постоянного тока.

2. Отсутствует описание разработанных компьютерных моделей предложенного способа программной широтно-импульсной модуляции (ПШИМ) с избирательным удалением гармоник (ИУГ), что не позволяет проверить его работоспособность и затрудняет верификацию полученных результатов.

3. В работе следовало бы уделить внимание вопросу о возможности применения разработанного способа управления реактивной мощностью активных выпрямителей напряжения различных фирм производителей на действующих промышленных предприятиях.

4. Рассмотренный алгоритм модуляции с избирательным удалением гармоник не является единственно возможным. В диссертации не приводится сравнение с другими алгоритмами ШИМ. На данный момент широко используются оптимальные алгоритмы ШИМ, которые необходимо было проанализировать в диссертации.

5. В цели диссертации указывается трехуровневый АВН и в самой работе внимание уделяется только трёхуровневой топологии построения преобразователей, однако в названии диссертации об этом не уточняется. Исходя из названия диссертации, следовало бы рассмотреть больше топологий построения активных выпрямителей, а не ограничиваться только трёхуровневой.

В ходе заседания диссертационного совета:

1. Какова экономическая эффективность представленного решения и в чём заключается неэффективность статических компенсаторов?

2. Где могут быть использованы результаты работы?

3. На слайде 13 представлены расчёты углов переключения ШИМ и при решении системы нелинейных уравнений вы использовали метод Ньютона-Рафсона. Чем обусловлен выбор этого метода решения, и какая максимальная степень уравнения решалась?

4. Почему на графиках нет реактивной мощности в режимах с потреблением активной мощности?

5. Из каких соображений выбиралась ёмкость конденсатора?

6. Не до конца ясно, почему на графиках получено напряжение 620 В.

7. Для каких диапазонов мощности и для каких смежных приемников возможно использование предлагаемых технических решений?

Соискатель Лисовская Т.А. ответила на заданные ей в ходе заседания вопросы и привела собственную аргументацию:

Тема компенсации реактивной мощности крайне актуальна, идея моей работы состоит в том, чтобы использовать прибор – активный выпрямитель напряжения – не предназначенный по прямому применению для компенсации реактивной мощности, как компенсатор на тех объектах, где он уже установлен и где имеются технологические паузы т.к. рассматриваются только режимы работы без потребления активной мощности. Обзор литературы показал, что такие решения применялись на металлургических предприятиях для группы черновых клетей, для обеспечения собственных нужд экскаватора, а также на ветро-энергетических установках. Использовать результаты этой работы могут фирмы производители активных выпрямителей напряжения.

Речь о неэффективности использования статических компенсаторов заключается в том, что при планировании нового производства можно избежать покупки отдельного оборудования (например, статического компенсатора), а возложить его задачу по компенсации реактивной мощности на АВН. В диссертационной работе не рассчитывалась экономическая эффективность, т.к. не рассматривался конкретный объект, на котором будет применена разработанная технология. Представлены примеры, где это возможно использовать и экономическую эффективность будет целесообразно рассчитывать уже для конкретного случая.

Метод Ньютона-Рафсона выбран для решения нелинейных уравнений т.к. это итерационный метод, который обладает достаточно быстрой и локальной сходимостью, в том случае если у нас определены достаточно конкретные, близкие к результатам начальные условия. Максимальная степень уравнения – третья.

Система управления построена так, что задание на потребление или генерацию реактивной мощности даётся только при отсутствии активной мощности, т.е. «на холостом ходу».

Все параметры моделирование, в том числе и ёмкость выбирались одинаковыми с параметрами стенда, на котором в дальнейшем проводились экспериментальные исследования, для удобства сравнения результатов.

Напряжение 620 В задаётся и поддерживается системой управления.

В рамках диссертационной работы не рассматривался конкретный объект, поэтому диапазон мощности рассчитать не представляется возможным.

Диссертационный совет установил, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, полностью соответствующую критериям «Положения о присуждении ученых степеней» №842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям.

На заседании 15 марта 2024 года диссертационный совет принял решение за разработку научно-обоснованных технических решений, направленных на разработку способа компенсации реактивной мощности в питающей сети посредством активных выпрямителей напряжения с программной широтно-импульсной модуляцией при избирательном удалении гармоник, присудить Лисовской Татьяне Александровне ученую степень кандидата технических наук.

При проведении тайного голосования совет в количестве 12 человек, из них 11 – докторов наук по специальности 2.4.2 Электротехнические комплексы и системы, участвовавших в заседании, из 14 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение ученой степени – 12, против присуждения ученой степени – нет, не проголосовали – нет.

Председатель

диссертационного совета



Корнилов Геннадий Петрович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Одинцов Константин Эдуардович

15 марта 2024 г.