

ОТЗЫВ

официального оппонента Обухова Сергея Геннадьевича на диссертационную работу **Шульц Татьяны Евгеньевны** на тему «Импедансный преобразователь в составе системы электроснабжения для возобновляемых источников энергии», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника»

1. Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 120 наименований, 4 приложений. Работа изложена на 128 страницах машинописного текста (включая список литературы), содержит 58 рисунков, 9 таблиц. Автореферат отражает содержание диссертационной работы в необходимом объеме.

2. Анализ содержания диссертационной работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, цель и задачи исследований, изложены основные положения, выносимые на защиту, а также научная новизна и практическая значимость диссертации.

В первой главе автором рассмотрены наиболее распространенные схемы DC-DC преобразователей, отмечены их основные недостатки и сделаны выводы о целесообразности применения импедансных цепей в системах преобразования электрической энергии на базе многоуровневых преобразователей NPC – типа.

Обоснована перспектива совместного использования импедансных цепей и многоуровневых полупроводниковых преобразователей. Данное совмещение позволяет рассматривать топологии преобразовательных схем в виде импедансных инверторов и добиваться улучшенных показателей. Отмечено, что можно повысить коэффициент преобразования по напряжению за счет применения импедансных цепей, а также снизить коммутационные потери мощности за счет применения новых способов широтно-импульсного управления.

В данной главе автор отмечает целесообразность применения векторных способов ШИМ как для трехфазных импедансных инверторов (ИИ), так и для однофазных. По результатам проведенного анализа сформулированы следующие задачи исследования: выполнить сравнительный анализ импедансных инверторов по массогабаритным показателям и потерям мощности; реализовать синтез структур ИИ с пониженным числом пассивных компонентов и диодов с целью повышения надежности работы и снижения потерь мощности; разработать новые векторные ШИМ для однофазных схем импедансных инверторов, обеспечивающие снижение числа коммутаций ключей и потерь мощности с сохранением возможности гибкой балансировки средней точки конденсаторов звена постоянного тока преобразователя.

Во второй главе предложена методика расчета параметров импедансных цепей (ИЦ). Автором получены аналитические соотношения, позволяющие проводить сравнительный анализ расчетных параметров элементов схемы ИЦ. Представлены зависимости их изменения от входного напряжения, коэффициента трансформации. На основании проведенных расчетов базовой схемы ИЦ была выбрана схема LCST-типа, так как по сравнению с другими схемами импедансных цепей она имеет меньшее число элементов и соответственно меньшие потери проводимости.

В третьей главе предложено семейство трехуровневых схем импедансных инверторов LCST-типа. Показан принцип их работы и произведен расчет их параметров. Данные собраны в сводную таблицу. Проведено моделирование схем преобразователей, результаты которых подтвердили теоретические расчеты, позволили выявить преимущества и недостатки различных схемотехнических решений. Для дальнейшей экспериментальной проверки выбрана схема с наименьшим числом пассивных компонентов и непрерывным входным током.

В четвертой главе описан принцип функционирования векторной ШИМ для однофазного трехуровневого инвертора. Дано пояснение основных понятий, таких как комбинации состояния ключей (КСК), построены векторные диаграммы и приведен порядок расчета весовых коэффициентов векторной ШИМ. Предложена векторная ШИМ для импедансного инвертора (ИИ), в которой используются дополнительные КСК, формирующие полное короткое замыкание (КЗ) стоек инвертора. Предложена последовательность КСК, снижающая количество коммутаций ключей импедансного инвертора. Для симметричной схемы ИИ, в которой доступны КСК частичного КЗ стоек, предложена модифицированная векторная ШИМ, в которой приведена последовательность КСК, значительно снижающая количество коммутаций в схеме. Проведено моделирование предложенных алгоритмов управления, которое показало, что предложенные векторные ШИМ позволяют поддерживать одинаковое напряжение на конденсаторах ИЦ, равномерно распределять токовую нагрузку ключей инвертора и на 30% сократить количество коммутаций ключей, а также на 24% улучшить коэффициент гармоник выходного напряжения.

В пятой главе приводятся данные экспериментальной проверки работоспособности предложенного трёхфазного трёхуровневого NPC LCCT-Z-инвертора с одним независимым входным источником напряжения. В качестве рабочего режима использовался режим непрерывного входного тока. Анализ проводился при различных вариантах скалярного и векторного ШИМ управления. Результаты проведенных экспериментов показали, что полученные ранее расчётные соотношения справедливы, что позволяет их использовать при проектировании. Расхождение теоретических и экспериментальных результатов не превышает 12%. Выполнен сравнительный анализ различных способов ШИМ, который показал, что предложенная модифицированная векторная ШИМ имеет лучший показатель по КПД при частотах векторной ШИМ, превышающих значение 160 кГц.

В заключении обобщаются основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Проведенный анализ содержания диссертационной работы свидетельствует о том, что диссертация Шульц Г.Е. является завершённой научной квалификационной работой, в которой содержится решение поставленных научных задач. Диссертация написана ясным и содержательным языком, принятая терминология и стиль соответствуют общепринятым нормам.

3. Актуальность темы исследования для науки и практики

Экономическое и техническое развитие промышленности приводит к увеличению потребления электрической энергии. На этом фоне возникает необходимость в использовании альтернативных источников энергии, в частности, солнечной энергии. Неравномерность и нестабильность солнечной инсоляции требует применения полупроводниковых устройств, обеспечивающих формирование необходимых параметров генерируемого напряжения. В этой связи разработка и применение полупроводниковых преобразователей, работающих от первичного источника с большим диапазоном изменения напряжения, является актуальной задачей.

В этом отношении применение импедансной цепи в трехуровневом инверторе может являться перспективным решением для обеспечения надежной работы инвертора от источника напряжения, выходное напряжение которого изменяется в широком диапазоне. Однако импедансные цепи содержат в своей структуре достаточно большое число элементов, которые могут снижать надежность работы всей установки. Спирожение числа компонентов в цепи импедансного звена позволило бы повысить надежность работы преобразователя. Несмотря на то, что структуры импедансных цепей в преобразовательной технике достаточно широко применяются, вопросы по совершенствованию их структур и способов управления ими остаются во многом нерешенными и требуют дополнительных исследований.

В связи с этим, диссертационная работа Шульц Т.Е., целью которой является улучшение характеристик преобразователей на основе импедансных цепей за счёт разработки новых топологий трёхуровневых импедансных инверторов с расширенным диапазоном регулирования выходного напряжения, является актуальной и своевременной.

4. Соответствие диссертации и автореферата паспорту специальности 05.09.12 – Силовая электроника

Целью диссертационного исследования является разработка новых топологий и способов управления режимами трёхуровневых импедансных инверторов, обеспечивающих повышение их эффективности. В диссертации и автореферате представлены результаты решения конкретных задач, направленных на совершенствование теоретической и технической базы преобразовательных устройств, создания новых преобразователей, систем их автоматики, управления и защиты, обладающих высокой энергетической эффективностью.

Основные положения и научные результаты, полученные в диссертационной работе, соответствуют п. 1 «Разработка научных основ создания схем и устройств силовой электроники, исследование свойств и принципов функционирования элементов схем и устройств», п. 2 «Теоретический анализ и экспериментальные исследования процессов преобразования в устройствах силовой электроники с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик», п. 4 «Математическое и схемотехническое моделирование преобразовательных устройств» паспорта специальности 05.09.12 – «Силовая электроника», что свидетельствует о соответствии диссертационной работы избранной специальности.

5. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность и новизна

Основными научными и наиболее важными результатами диссертационной работы являются:

- разработана методика по оценке и сравнению схем импедансных цепей, включающей оценку через энергию, накопленную в конденсаторах и дросселях;
- разработан трёхуровневый NPC LCCT-Z-инвертор с наименьшим числом компонентов импедансной цепи по сравнению с другими схемами, потребляющими непрерывный входной ток;
- предложен новый способ ШИМ однофазным трёхуровневыми импедансным инвертором с нулевой точкой, который позволяет повысить КПД схемы за счёт снижения количества коммутаций ключей.

Основные выводы и результаты диссертационного исследования теоретически обоснованы и получены автором впервые. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы соискателя подтверждается корректным использованием научно-обоснованных методов исследований, сходимостью экспериментальных и расчетных данных. Результаты, полученные при проведении экспериментальных испытаний, подтверждают справедливость научных положений и применимость предложенных методов, технических решений и выводов. Результаты исследований обсуждались на международных и всероссийских конференциях, по результатам работы опубликовано достаточное количество научных работ.

6. Практическая значимость результатов исследований

Практическая значимость работы заключается в разработке методики расчета основных параметров компонентов импедансных инверторов, позволяющая проводить сравнительный анализ различных схемных решений. Полученные теоретические и практические результаты могут быть использованы в инженерных расчётах при проектировании систем генерирования электрической энергии на возобновляемых источниках энергии.

7. Апробация работы и подтверждение опубликования её основных положений и результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. Closing Conference of the Project "Doctoral School of Energy and Geotechnology II," January 12 - 17, 2015, Пярну, Эстония;
2. 2015 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), May 11-13, 2015, Riga, Latvia;
3. 4th International Doctoral School of Electrical Engineering and Power Electronics, the student sport centre "Ronishi" of Riga Technical University, 29 - 30 May, 2015, Latvia;
4. 16th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), June 29 2015-July 3, 2015, Республика Алтай, Чемальский район, ЗСОК НГТУ «Эрлагол», РФ;
5. 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), November 9 – 12, 2015, Yokohama, Japan. - доклад соавтора;
6. 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM) 30 июня - 4 июля 2016, Республика Алтай, Чемальский район, ЗСОК НГТУ «Эрлагол», РФ;
7. 16th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology III" 16-21 января 2017 Пярну, Эстония. - Приз за лучшее выступление в секции;
8. 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. 29 июня - 3 июля 2018, Республика Алтай, Чемальский район, ЗСОК НГТУ «Эрлагол», РФ;
9. 19th International Symposium "Topical problems in the field of electrical and power engineering" and "Doctoral School of Energy and Geotechnology III" 14-17 января 2020 Тарту, Эстония.

Результаты выполненных исследований отражены в 17 публикациях, в том числе 2-х статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 3 публикациях в зарубежных журналах уровня Q1, Q2, Q3, 1 патенте, 6 статьях, индексируемых в SCOPUS и WoS. Автореферат диссертации и публикации достаточно полно отражают основное содержание диссертационной работы.

8. Основные замечания по работе

В целом содержание диссертационной работы Шульц Т.Е., её основные положения, выводы и результаты возражений не вызывают. Однако, можно сделать следующие замечания:

1. При обосновании актуальности темы исследования в качестве ключевых факторов, определяющих величину выходного напряжения солнечных батарей (СБ), автор указывает уровень освещённости, частичное затенение СБ, географическое расположение и высоту над уровнем моря. При этом основным фактором, определяющим величину выходного напряжения СБ является температура поверхности фотоэлектрических модулей, которая в число ключевых факторов не включена.
2. Хороший преобразователь в составе систем электроснабжения на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) должен обеспечивать не только преобразование энергии с высоким КПД, но и максимально эффективное использование доступной природной энергии. В стандартных преобразовательных устройствах из последовательно включенных повышающего DC/DC преобразователя и инвертора данное требование реализуется с помощью систем экстремального регулирования на основе контроллера максимальной мощности DC/DC преобразователя. Имеющиеся возможности и способы экстремального регулирования входной мощности предложенного преобразователя в работе не рассматриваются, что позволяет считать утверждение автора о том, что в

составе систем электроснабжения на базе ВИЭ DC/DC преобразователь может быть заменен на ИЦ, является недостаточно обоснованным.

3. В разделе 2.6 проведен сравнительный анализ импедансных цепей, в результате которого получены функциональные зависимости относительной длительности интервала КЗ и параметров элементов ИЦ от входного напряжения и коэффициента трансформации. При выполнении анализа автор использует фиксированные значения коэффициентов пульсаций тока и напряжения и частоты ШИМ, при этом какие это численные значения, и почему именно они приняты при проведении исследований из материалов работы не ясно.
4. В работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований предложенных схемы преобразователя и способов управления только на стационарную нагрузку с неизменными параметрами. Однако в реальных условиях эксплуатации возможны изменения параметров нагрузки в статическом режиме, а также динамические и аварийные режимы работы преобразователя, анализ которых в работе отсутствует.
5. В работе встречается небольшое количество грамматических и стилистических ошибок, в частности на стр. 6, 39, 56, 91 и др.

9. Общее заключение о соответствии диссертационной работы требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям

Представленная диссертация является завершённой научно-квалификационной работой. Научно-технические решения, полученные автором в диссертационной работе, направлены на решение актуальной задачи разработки новых топологий и способов управления режимами трёхуровневых импедансных инверторов, обеспечивающих повышение их эффективности.

На основании анализа актуальности темы, степени обоснованности научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, их достоверности и новизны, а также значимости для науки и практики, считаю, что диссертация Шульц Т. Е. на тему «Импедансный преобразователь в составе системы электроснабжения для возобновляемых источников энергии» соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор **Шульц Татьяна Евгеньевна** заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника».

Официальный оппонент,
доктор технических наук, профессор отделения электроэнергетики
и электротехники Инженерной школы энергетики
Национального исследовательского Томского политехнического университета



Сергей Геннадьевич Обухов

Россия, 634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, ИШЭ, ОЭЭ
тел. (382-2) 701-777, доп.1942,
e-mail: serob99@mail.ru

«4» марта 2022 года

Подпись С.Г. Обухова заверяю:
Ученый секретарь ТПУ



Екатерина Александровна Кулич