

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)»

А.В. Коржов

« 14 » марта 2022 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию Шульц Татьяны Евгеньевны

«Импедансный преобразователь в составе системы электроснабжения для возобновляемых источников энергии», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – “Силовая электроника”

Актуальность темы работы. Загрязнение окружающей среды выбросами электростанций заставляет мировое сообщество уделять все большее внимание применению технологий зеленой энергетики. Одним из технологических решений на которое делается значимая ставка является использование фотоэлектрических преобразователей солнечной энергии в электрическую. Поскольку количество получаемой электрической энергии в таких установках зависит от погодных условий и варьируется в широком диапазоне, то подключение генерирующей установки к нагрузке (потребителю) требует применения полупроводникового преобразователя. Наличие преобразователя в системе генерирования должно сопровождаться рядом требований, среди которых высокий КПД, широкий диапазон регулирования входного напряжения (тока), а также формирование непрерывного входного тока. Этого можно добиться схемотехнически и с помощью алгоритмов управления преобразователем.

В связи с отмеченным выше, диссертация Шульц Т.Е., посвященная поиску новых схемотехнических и алгоритмических решений по управлению в области силовых полупроводниковых преобразователей, предназначенных для использования в системах генерирования электрической энергии на базе фотоэлектрических преобразователей (солнечных батарей) является актуальной.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Объем диссертации составляет 128 страниц, 58 рисунков, 9 таблиц, библиографический список из 120 источников.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, новизна основных научных положений, а также представлена практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен аналитический обзор существующих решений среди повышающих DC-DC преобразователей, импедансных цепей (ИЦ) и их модификации, а также многоуровневых инверторов и многоуровневых импедансных инверторов (ИИ). Сделаны выводы о том, что для решения поставленных задач

требуется провести анализ существующих ИЦ и сравнить их основные показатели, например, потери мощности и электрические параметры их элементов.

Отмечено, что в качестве перспективного схемотехнического решения для создания систем генерирования электрической энергии может быть реализация системы на базе трехуровневого инвертора с диодной фиксацией уровня. В главе было показано, что для однофазной трёхуровневой импедансной схемы имеется необходимость в разработке векторных способов широтно-импульсной модуляции (ШИМ), эффективно использующих дополнительные состояния ключей трёхуровневого инвертора, направленные на снижение коммутационных потерь в ключах схемы, осуществляющие гибкую балансировку нейтральной точки конденсаторов и улучшающие качество выходного напряжения системы генерирования.

Во второй главе проведен анализ существующих импедансных цепей. Показана необходимость в разработке методики для расчета основных параметров ИЦ, на основании которых можно провести их сравнительный анализ. Автору удалось разработать методику, основанную на ряде аналитических соотношений, подходящих для расчета основных параметров всех рассматриваемых ИЦ. В главе представлен расчет по предложенной методике. Рассчитанные электрические параметры импедансных цепей показали, что среди схем ИЦ нельзя выбрать одну с наилучшими параметрами. Однако, полученные соотношения позволяют обеспечить расчет и выбор схемы под конкретные технические требования.

Автором отмечено, что схема LCCT-типа характеризуется наилучшими параметрами по потерям проводимости, номинальных значениях ёмкостей и индуктивностей. В дополнении отмечено, что эту схему можно модифицировать для трехуровневого инвертора, снизив число пассивных компонентов ИЦ до минимума.

В третьей главе предложено семейство трехуровневых схем LCCT-типа – две схемы, потребляющие прерывистый входной ток, и две – с непрерывным входным током. Показан основной принцип их работы, произведены расчеты их параметров. Расчетные данные сведены в таблицу.

В главе автор показал, что топологии схем, потребляющие прерывистый входной ток, не имеют преимуществ перед схемами, потребляющими непрерывный входной ток. В этой связи автор в дальнейших своих исследованиях сосредоточился на анализе схем с непрерывным входным током.

Для проверки достоверности теоретических исследований было выполнено моделирование схем преобразователей в среде программного обеспечения PSIM. Результаты моделирования подтвердили теоретические расчеты с точностью 2-3%.

Для дальнейшей экспериментальной проверки выбрана схема с наименьшим числом пассивных компонентов и непрерывным входным током. Выявлены как преимущества, так и недостатки такого схемотехнического решения. Показано, что для уменьшения потерь мощности в импедансной цепи необходимо снизить число содержащихся в ней диодов, которые обеспечивают значимые потери мощности в схеме.

В четвертой главе рассмотрены способы реализации скалярной и векторной ШИМ. Отмечено преимущество применения векторной ШИМ в импедансных схемах преобразователей. Предложен способ векторной ШИМ для однофазного трехуровневого инвертора. Показан принцип его работы, особенности применения комбинаций состояний ключей (КСК) инвертора, векторные диаграммы. Для

расчета временных интервалов действия КСК автором отмечены соотношения для весовых коэффициентов. Далее предлагается векторный ШИМ для импедансного инвертора (ИИ). Его особенностью является наличие дополнительных КСК определяющих полное короткое замыкание (КЗ) стоек инвертора. Произведен расчет весовых коэффициентов и предложена последовательность КСК, позволяющая снизить количество коммутаций ключей инвертора, при этом обеспечить баланс напряжений на конденсаторах инвертора. Затем, основываясь на идее того, что в симметричной схеме ИИ можно создавать и использовать состояния частичного КЗ стоек, был предложен модифицированный векторный алгоритм ШИМ. Произведены соответствующие расчеты и приведена последовательность КСК значительно снижающая количество коммутаций в схеме.

Для оценки предложенных способов векторных ШИМ проведено их моделирование. Моделирование показало, что предложенные векторные ШИМ позволяют обеспечить равномерное распределение загрузки ключей инвертора, поддерживать одинаковое напряжение на конденсаторах ИЦ. При этом модифицированный способ ШИМ позволил сократить на 30% количество коммутаций и коэффициент гармоник выходного напряжения улучшен на 24%. Отмечено, что реализации данных способов ШИМ не требует введения в алгоритмы управления так называемого «мертвого времени».

В пятой главе содержатся данные экспериментальной проверки работоспособности предложенной схемы трёхфазного трёхуровневого LCST-Z-инвертора с диодной фиксацией уровня. Проведено сравнение скалярного и предложенных векторных способов ШИМ. Для предложенной схемы LCST-Z-инвертора был собран экспериментальный прототип преобразователя. Исследование показало, что КПД прототипа находилось в диапазоне 90-94%. Отмечено, что максимальный КПД соответствует инверторному режиму работы схемы без состояний короткого замыкания, при индексе модуляции $M=1$. Показано, что введение состояний короткого замыкания уменьшает КПД схемы. Для эксперимента со способами управления использовался готовый макет преобразователя, состоящий из платы трёхуровневого инвертора с диодной фиксацией уровня, платы симметричной цепи q-Z-типа, и платы управления. Представленные экспериментальные результаты подтвердили теоретические исследования. Модифицированная векторная ШИМ показывает наилучшие результаты по КПД – 91,5% в области более высоких мощностей нагрузки и 92,4% при высоких значениях частоты ШИМ (160-240 кГц).

В заключении приведены основные выводы по результатам исследований.

Практическая значимость.

Диссертационная работа Шульц Т.Е. имеет практическую значимость, о чем свидетельствует акт о практическом применении научных результатов диссертационной работы в ОА «ПО «Север»», представленный в приложении к диссертации. Математические и имитационные модели использовались при выборе и обосновании технических решений на стадии разработки преобразователя частоты ПЧА для системы СГА-ОН.

Результаты работы были внедрены в учебный процесс в курсах «Силовая электроника для возобновляемой энергетики» и «Специальные главы энергетической электроники» для магистров направления 11.04.04 «Электроника и

нанoeлектроника» по магистерской программе «Промышленная электроника и микропроцессорная техника», о чем также свидетельствует акт внедрения.

По диссертации имеются следующие **замечания и дискуссионные положения**:

1. В работе следовало обосновать, почему в эквивалентной схеме замещения магнитосвязанного дросселя индуктивность намагничивания подключается параллельно первичной обмотке трансформатора.

2. В тексте диссертации встречаются непонятные термины. Например, на стр. 28 автор пишет «Для получения на нагрузке полного напряжения должны быть открыты оба соединённых параллельно транзистора». Что значит «полное напряжение»?

3. В главах 2 и 4 все основные аналитические выражения для импедансных цепей, а также системы уравнений для векторных ШИМ приведены без вывода, что несколько затрудняет понимание материала.

4. Сравнительный анализ импедансных цепей проводился при значении коэффициентов трансформации $n = 2$ и $n = 4$. Почему в работе не рассматривались значения больше 4?

5. В работе следовало бы провести расчет параметров LCL-фильтра на выходе трехуровневого инвертора, а не ограничиваться только расчетом элементов импедансных цепей.

6. На наш взгляд работа бы только выиграла, если бы в ней был рассмотрен однофазный трехуровневый импедансный инвертор не только на базе мостовой схемы, но и полумостовой, что позволило бы в 2 раза уменьшить количество силовых транзисторов в схеме.

7. В тексте диссертации присутствуют опечатки, например: стр. 24 – «к терминалу напряжение U_0 », «на протяжении интервала», стр. 33 – «широотно-импульсного моделирования», и другие.

Данные замечания не снижают значимости основных результатов диссертационной работы.

Содержание диссертации отражает основные идеи работы, раскрывает ее научную и практическую значимость, достаточно полно опубликовано в 17 печатных работах, из которых в журналах из списка ВАК – 2, в научных изданиях, индексируемых базами Scopus/Web of Science – 9, в том числе публикации в высоко цитируемых рецензируемых зарубежных научных журналах уровня Q1, Q2, Q3 – 3; одном зарубежном патенте.

Автореферат диссертации правильно отражает ее основное содержание, научную новизну, выводы и другие ключевые моменты.

Заключение. Диссертационная работа Шульц Татьяны Евгеньевны соискателя «Импедансный преобразователь в составе системы электроснабжения для возобновляемых источников энергии» является законченным научным исследованием по актуальной теме. В работе представлены результаты, имеющие важное научное и практическое значение для специальности 05.09.12 – «Силовая электроника». Результаты исследований, представленные в диссертации, делают существенный вклад в решение актуальной задачи по поиску новых схемотехнических и алгоритмических решений в области силовых полупроводниковых преобразователей, подходящих для использования в системах,

запитанных от фотоэлектрических преобразователей и питающих нагрузку переменного тока.

Диссертационная работа соответствует критериям, установленным пп. 9-14 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (ред. от 11.09.2021), а ее автор Шульц Татьяна Евгеньевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.12 – “Силовая электроника”.

Диссертация и отзыв обсуждены на заседании кафедры «Электропривод и мехатроника» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» Протокол № 07 от 14.03.2022 г.

Григорьев Максим Анатольевич
главный научный сотрудник,
заведующий кафедрой «Электропривод и мехатроника»
доктор технических наук, профессор,
тел +7 (351) 267-93-21
e-mail: grigorevma@susu.ru
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
(диссертация защищена по специальности
05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”)



Дудкин Максим Михайлович
профессор кафедры «Электропривод и мехатроника»
доктор технических наук, доцент,
тел +7 (351) 267-93-21
e-mail: dudkinmm@susu.ru
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
(диссертация защищена по специальности
05.09.12 – “Силовая электроника”)



Маклаков Александр Сергеевич
доцент кафедры «Электропривод и мехатроника»
кандидат технических наук, доцент,
тел +7 (351) 267-93-21
e-mail: maklakovas@susu.ru
454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76
(диссертация защищена по специальности
05.09.12 – “Силовая электроника”)



Южно-Уральский государственный университет
454080, Челябинская область, г. Челябинск,
проспект В.И. Ленина, д.76.
E-mail: info@susu.ru, тел. +7 (351) 267-99-00