

ОТЗЫВ

официального оппонента Краснобаева Юрия Вадимовича
на диссертацию **Осипова Александра Владимировича**
на тему "ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНЫЕ РЕГУЛИРУЕМЫЕ
РЕЗОНАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫХ И
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОПОЛОГИЙ "
по специальности 05.09.12 – Силовая электроника
на соискание учёной степени доктора технических наук.

1. Актуальность диссертации

Развитие техники приводит к расширению областей применения силовых электронных устройств и ставит задачи по улучшению их характеристик. Например, для возобновляемой энергетики, электротранспорта и для иных автономных объектов важной задачей является повышение энергетической эффективности силовых электронных устройств, которые обеспечивают заряд и разряд накопителей энергии, формируют требуемые параметры электроэнергии у конечного потребителя. Аналогичные задачи ставятся и перед силовыми устройствами, которые используются в различных электротехнологических процессах. Поэтому регулируемые резонансные преобразователи находят всё более широкое применение в силовой электронике. Это обусловлено рядом их положительных свойств, и прежде всего, возможностью обеспечения благоприятных коммутационных условий переключения транзисторов. Одной из основных проблем, возникающих при разработке таких преобразователей, является обеспечение регулирования выходных параметров. Широко применяемое фазовое регулирование, реализуемое за счет введения интервалов рекуперации, приводит к ухудшению энергетических характеристик, что выражено в увеличении тока резонансного контура и, соответственно, статических потерь энергии в преобразователе.

Основной идеей работы является применение свойств параметрического преобразования импеданса нагрузки последовательно-параллельной топологией

резонансного контура для решения задачи повышения энергетической эффективности. Такой подход позволяет синтезировать наиболее энергетически эффективные режимы работы преобразователя и является основным направлением исследований, выполненных в рамках диссертации.

Таким образом, исследования, направленные на повышение энергетической эффективности режимов регулирования резонансного преобразователя, безусловно, актуальны и нуждаются во всестороннем развитии.

2. Анализ содержания диссертации и рекомендации использования

Диссертация изложена на 327 страницах основного текста, содержит 191 рисунок, 14 таблиц, список литературы из 182 наименований, 1 приложение на 5 страницах. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и одного приложения.

Во введении обоснована актуальность темы, обозначены цель и задачи исследований, представлена научная новизна и практическая ценность работы, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния научных исследований в области регулируемых преобразователей для систем электропитания и индукционного нагрева, обозначены факторы, влияющие на энергетическую эффективность и противоречия, возникающие при синтезе способа регулирования, показаны свойства последовательно параллельных топологий резонансного контура. Выдвинуты пути решения проблемы, заключающиеся в комплексном применении импульсного регулирования и параметрического преобразования импеданса нагрузки.

Во второй главе рассмотрены режимы работы регулируемого последовательного резонансного преобразователя постоянного напряжения с непрерывной частотной подстройкой. Проведен анализ данного типа преобразователя применительно к системам заряда-разряда аккумуляторов с широко-импульсным регулированием напряжения инвертора или выпрямителя.

Отмечена связь режима регулирования напряжения со способом ограничения разрядной мощности аккумуляторной батареи. Проведен анализ предложенного способа регулирования в вольтодобавочной структуре резонансного преобразователя.

В третьей главе предложен способ параметрической стабилизации выходного напряжения резонансного *LCL*-преобразователя при питании от источника тока, которым может являться солнечная батарея. Применен принцип компенсации возмущений нагрузки импедансным преобразованием, реализуемым резонансным *LCL*-контуром, при этом нестабильность тока солнечной батареи устраняется предложенным широтно-импульсным регулированием с фазовым смещением напряжения выпрямителя. В диссертации показано, что данный способ регулирования позволяет сохранить мягкое включение транзисторов и стабильность коэффициента передачи при изменении нагрузки.

В четвертой главе проведено исследование резонансных преобразователей в режиме генерирования двухчастотного тока, применяемых в системах индукционного нагрева для формирования сложной формы температурного профиля. Проведено исследование энергетической эффективности способов формирования и регулирования двухчастотного тока на основе многократных разновидностей ШИМ.

В пятой главе проведен анализ режимов согласования выходных параметров резонансного преобразователя с нагрузкой на основе *LCLC*-топологии резонансного контура. Показаны энергетические преимущества формирования требуемого коэффициента передачи тока на нижней резонансной частоте. Проведен анализ энергетических характеристик регулируемого резонансного преобразователя при изменяющейся нагрузке в режимах стабилизации тока индуктора и выходной мощности.

В шестой главе проведены экспериментальные исследования резонансных преобразователей, представленные в виде результатов практической реализации предложенных решений в промышленных и макетных образцах.

В заключении обобщены основные результаты, проведенных в диссертации исследований.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации, содержит выносимые на защиту результаты работы, имеющие научную новизну и практическую ценность.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть рекомендованы к использованию:

- в системах электропитания автономных объектов, в которых первичный источник энергии – солнечная батарея, эксплуатируется на участке вольт-амперной характеристики с мало изменяющимся током;
- в силовых преобразователях для заряда-разряда аккумуляторов;
- в силовых установках для электротехнологической обработки материалов, например, в системах индукционного нагрева.

3. Научная и практическая значимость

Научная новизна диссертационной работы заключается в первую очередь в развитии теории регулирования выходных параметров резонансных преобразователей. Исследования в данном направлении привели к разработке ряда способов и принципов построения регулируемых преобразователей и отражены в следующих, обладающих новизной, научных результатах:

1. Базовая концепция синтеза режимов регулирования выходных параметров резонансных преобразователей, основанная на одновременном применении импульсного регулирования и параметрического импедансного преобразования, осуществляемого резонансным контуром последовательно-параллельной топологии.

2. Способ частотно-широотно-импульсного регулирования выходного напряжения резонансного преобразователя с активным выпрямителем, при котором подстройка частоты обеспечивает минимизацию интервалов рекуперации энергии и статических потерь.

3. Способ широтно-импульсного регулирования выходных параметров резонансного LCL -преобразователя постоянного напряжения с фазовым смещением напряжения активного выпрямителя, обеспечивающий стабильность коэффициента передачи при изменении нагрузки.

4. Принцип формирования двухчастотного тока резонансным преобразователем с многократной широтно-импульсной модуляцией, заключающийся в создании $LCLC$ -контуром разных коэффициентов передачи тока на синтезируемых частотах, что обеспечивает компенсацию вносимых нагрузкой частотных искажений.

5. Способ согласования выходных параметров регулируемого резонансного инвертора с нагрузкой на нижней резонансной частоте $LCLC$ -контура, в области которой формируется интервал увеличивающегося коэффициента передачи тока, что позволяет уменьшить ток инвертора.

6. Способ стабилизации мощности изменяющейся нагрузки, реализуемый на основе резонансного преобразователя с $LCLC$ -контуром и заключающийся в формировании области стабильного к изменению нагрузки значения входного импеданса резонансного контура, обеспечивающего минимизацию тока инвертора.

Практическая значимость результатов диссертации заключается в повышении энергетической эффективности преобразователя за счет формирования требуемой частотной зависимости коэффициента передачи тока резонансного контура, что позволяет уменьшить значение тока инвертора и статические потери преобразования.

4. Обоснованность и достоверность результатов диссертации

Достоверность предложенных решений и сделанных на их основе выводов подтверждается корректным использованием математического аппарата, методов математического моделирования, верификацией результатов имитационного моделирования и экспериментальных исследований, проведенных на макетных и опытно-промышленных образцах. Главы диссертационной работы логически

взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органически вытекают из материалов теоретических и экспериментальных исследований.

5. Публикации

По теме диссертации автором опубликовано 75 научных работ, из которых 30 – в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 16 публикаций, в изданиях индексируемых в реферативной базе Scopus, получено 20 патентов на изобретения и полезные модели РФ. Материалы диссертации достаточно полно отражены в печати.

6. Замечания по диссертации

1. Насколько адекватна замена солнечной батареи идеальным источником тока? При моделировании процессов, правильнее было бы рассматривать реальный участок вольт-амперной характеристики солнечной батареи.
2. Непонятно с какой целью приводятся многоячейковые структуры построения резонансного преобразователя в главе 1, если они не рассматриваются далее в работе.
3. Не достаточно уделено внимание определению значения тока резонансного контура на момент коммутации, который обеспечивает перезаряд паразитных емкостей транзисторов и, собственно, условия мягкого переключения транзисторов, т.е. условия ZVS.
4. Не ясно, каким образом в последовательном резонансном преобразователе с частотной подстройкой обеспечивается работа в режимах малых нагрузок, близких к холостому ходу?

7. Заключение

Диссертация Осипова А.В. является законченной научно-технической работой, содержащей решение проблемы повышения энергетической эффективности резонансных преобразователей, имеющей существенное значение для отрасли силовой электроники. Полученные результаты являются новыми, отмеченные замечания носят дискуссионный характер и не являются

принципиальными. Считаю, что диссертационная работа «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий» соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Осипов Александр Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

Профессор кафедры «Системы автоматики,
автоматизированное управление и
проектирование» ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»,
доктор техн. наук, профессор



Краснобаев Юрий Вадимович

05 июля 2022 г.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»



ФГАОУ ВО СФУ

Подпись Ю.В. Краснобаева заверяю

начальник общего отдела А.И. Сироткин

от 05.07.2022 г.

Почтовый адрес: 660041, Красноярский край, г. Красноярск,
ул. акад. Киренского 26, корп., кафедра «Системы автоматики, автоматизированное
управление и проектирование»
телефон: +7 (391) 2-912-235
эл.адрес: ykrasnobayev@sfu-kras.ru