

УТВЕРЖДАЮ:



Проректор по научной работе и инновациям
ФГБОУ ВО ТУСУР

к.т.н., доцент
А.Г. Лоцилов

«14» 03 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Диссертация «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий» выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР)

Осипов Александр Владимирович окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники в 1999 году по специальности «Промышленная электроника». В период подготовки диссертации соискатель работал в Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники на кафедре Промышленной электроники в должности доцента.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук на тему «Системы высокочастотного индукционного нагрева заготовок перед пластической деформацией» по специальности 05.09.12 силовая электроника защищена в 2004 году в совете Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники.
Научный консультант – Рулевский В.М., д.т.н., доцент, ректор ТУСУР.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

В диссертационной работе Осипова А.В. обобщены научные, экспериментальные исследования и практические разработки автора, направленные на решение крупной научно-технической проблемы, заключающейся в развитии теории и создании научных основ синтеза режимов регулирования выходных параметров резонансных преобразователей электрической энергии. В работе раскрыта актуальность темы исследования, произведена оценка степени ее проработанности. Предложена новая оригинальная концепция, заключающаяся в повышении энергетической эффективности режима регулирования выходных параметров преобразователя за счет осуществляемого последовательно-параллельной топологией резонансного контура параметрического импедансного преобразования параметров нагрузки.

Личный вклад автора диссертационной работы состоит в определении направлений исследований, в проведении экспериментов, в самостоятельном формулировании выводов и научных положений. Результаты, составляющие научную основу диссертации и выносимые на защиту, получены автором самостоятельно. Работы [19,25,28,32] выполнены автором единолично. В работах, написанных в соавторстве, автор формировал концепцию и идею проводимого исследования. В работах [1-6] автором исследованы энергетические свойства резонансного инвертора при импульсном регулировании его выходного тока в условиях изменяющихся импедансных характеристиках нагрузки. В работах [12,13,16,18,30] сформулированы принципы построения регулируемых резонансных преобразователей постоянного напряжения. В работах [26,27] предложен преобразователь с кодово-

импульсным регулированием выходного напряжения. В работах [14,15,17,21,22] обобщены способы формирования ZVS переключения транзисторов в преобразователях постоянного напряжения. В работах [20,24,29,31] автором предложены режимы регулирования выходных параметров резонансного преобразователя с LCL топологией резонансного контура, осуществляющей импедансное преобразование нагрузки. В работах [7,10] предложено применение импедансного преобразования для регулирования двухчастотного тока резонансного $LCLC$ преобразователя.

Достоверность результатов выводов и рекомендаций, представленных в работе, определяется строгим обоснованием принимаемых допущений, корректным использованием методов научных исследований, а также подтверждается экспериментальными исследованиями. Все разделы диссертационной работы логически взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органически вытекают из материалов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна диссертационной работы

1. Предложена обобщенная концепция синтеза режимов регулирования выходных параметров резонансных преобразователей, отличающаяся тем, что параметрическое импедансное преобразование нагрузки, осуществляемое последовательно-параллельной топологией резонансного контура, рассматривается как средство улучшения энергетической эффективности режима регулирования.
2. Разработан способ широтно-импульсного регулирования выходных параметров резонансного преобразователя постоянного напряжения, отличающийся введением адаптивной подстройки частоты реализуемой по условию минимизации интервалов рекуперации энергии.
3. Установлено, что при реализации широтно-импульсного регулирования активным выпрямителем происходит изменение его входного сопротивления и приведенного сопротивления резонансного контура, что приводит к увеличению добротности и уменьшает требуемую величину частотной подстройки.
4. Разработан способ широтно-импульсного регулирования коэффициента передачи резонансного LCL преобразователя постоянного напряжения, отличающийся введением фазового смещения напряжения активного выпрямителя по условию формирования равных фаз тока в инверторе и выпрямителе, что позволяет сохранить заданный режим импедансного преобразования во всем диапазоне регулирования.
5. Установлено, что при синтезе двухчастотного тока резонансным инвертором, ток резонансного контура имеет частотные искажения, обусловленные непропорциональным потреблением синтезируемых гармоник, что является причиной ухудшения энергетической эффективности преобразования.
6. Разработан принцип формирования двухчастотного тока резонансным $LCLC$ преобразователем на основе многократной ШИМ, отличающийся компенсацией вносимых нагрузкой частотных искажений импедансным преобразованием резонансного контура, выраженным во введении разных коэффициентов передачи тока на синтезируемых частотах.
7. Предложен способ согласования выходных параметров регулируемого резонансного инвертора с нагрузкой, отличающийся настройкой $LCLC$ контура нижнюю резонансную частоту, в области которой за счет импедансного преобразования формируется область увеличивающегося коэффициента передачи тока.
8. Разработан способ стабилизации мощности на изменяющейся нагрузке, отличающийся параметрическим преобразованием ее параметров резонансным $LCLC$ контуром,

настроенным по условию образования области стабильного входного импеданса резонансного контура.

Практическая значимость

1. Предложенная концепция синтеза режимов регулирования выходных параметров резонансных преобразователей позволяет уменьшить статические потери за счет импедансного преобразования нагрузки.
2. Разработанный способ частотно-широотно-импульсного регулирования напряжения резонансного преобразователя позволяет минимизировать ток резонансного контура и обеспечить коммутацию транзисторов в условиях ZVS.
3. Предложенный резонансный *LCL* преобразователь с активным выпрямителем за счет импедансного преобразования нагрузки позволяет уменьшить ток выпрямителя и статические потери.
4. Предложенный принцип формирования двухчастотного тока нагрузки резонансным *LCLC* преобразователем позволяет за счет настраиваемых коэффициентов передачи тока на синтезируемых частотах достичь комплексного улучшения энергетической эффективности.
5. Предложенный способ согласования параметров преобразователя с нагрузкой на нижней частоте резонансного *LCLC* контура позволяет уменьшить ток инвертора и его статические потери.
6. На основе предложенных решений разработан ряд преобразователей различного назначения, имеющих высокие показатели энергоэффективности.

Полнота изложения материалов работы в публикациях

Материалы диссертационного исследования Осипова А.В. достаточно полно отражены в 75 научных работах, среди которых: 30 статей в журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 16 публикаций, индексируемых в реферативной базе Scopus, 20 патентов на изобретения и полезные модели РФ, 18 тезисов докладов в материалах конференций.

Публикации в научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Владимиров С.Н. Особенности индукционного нагрева ферромагнитных сталей при различных режимах работы преобразователя частоты / С.Н. Владимиров, С.К. Земан, А.В. Осипов, В.П. Толстов // Известия вузов. Электромеханика. – 2004. – №1. – С. 50–54.
2. Земан С.К. Многочастотные регулируемые резонансные преобразователи частоты с многозонной модуляцией в системах высокочастотного индукционного нагрева / С.К. Земан, А.В. Осипов // Электротехника. – 2006. – № 4. – С. 49–56.
3. Земан С.К. Исследование зависимостей характеристик резонансного контура от конструктивных и электрических параметров системы «индуктор – нагреваемый объект» / С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – №1. – С. 197–202.
4. Земан С.К. Системы индукционного нагрева с непрерывным способом загрузки секционированного индуктора / С.К. Земан, А.В. Осипов // Известия вузов. Электромеханика. – 2007. – №2. – С. 32–39.
5. Земан С.К. Исследование цифровых систем фазовой автоматической подстройки частоты последовательного резонансного инвертора / С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров // Электротехника. – 2008. – № 1. – С. 28–35.
6. Земан С.К. Исследование влияния параметров управляющего воздействия на характеристики системы фазовой автоматической подстройки частоты последовательного резонансного инвертора / С.К. Земан, А.В. Осипов, М.С. Сахаров // Электротехника. – 2008. – № 10. – С. 57–62.
7. Земан С.К. Формирование двухчастотных колебаний тока в системах индукционного нагрева / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов, А.В. Юшков // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 4. – С. 105–111.
8. Шиняков Ю.А. Автоматизированная фотоэлектрическая установка с повышенной

- энергетической эффективностью / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, А.В. Осипов, О.А. Теушаков, К.В. Аржанов // Доклады ТУСУР. – 2011. – №2. – С. 282-287
9. Шиняков Ю.А. Автономная фотоэлектрическая энергетическая установка / Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, В.В. Аржанов, О.А. Теушаков, А.В. Осипов // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – №4. – Том 320. – С. 133-138.
10. Земан С.К. Синтез двухчастотного тока индуктора на основе суммирования выходных параметров двух разночастотных резонансных преобразователей / С.К. Земан, Ю.М. Казанцев, А.В. Осипов, А.В. Юшков // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – №4. – Том 321. – С. 144-150.
11. Осипов А.В. Сопоставительный анализ энергетической эффективности преобразования энергии солнечной батареи преобразователями постоянного напряжения / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, А.И. Отто, М.М. Черная // Доклады ТУСУР. – 2013. – № 1(27). – С. 14–19.
12. Осипов А.В. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых преобразователей с промежуточным звеном повышенной частоты / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Известия Томского политехнического университета. 2013. – №4. – Том 323. – С.126-132
13. Осипов А.В. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых инверторов тока / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная, А.А. Ткаченко // Известия Томского политехнического университета. 2014. – №4. – Том 324. – С.102-109.
14. Осипов А.В. Обеспечение благоприятного переключения транзисторов инвертора тока в преобразователях со звеном повышенной частоты / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная, А.А. Ткаченко // Известия Томского политехнического университета. – 2015. – №4. – Том 226. – С. 138-145.
15. Запольский С.А. Анализ способов реализации мягкого переключения транзисторных ключей повышающего преобразователя для энергосистемы космического аппарата / С.А. Запольский, Е.В. Загородских, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, А.В. Осипов // Доклады ТУСУР. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 90–93.
16. Осипов А.В. Структуры построения высоковольтных систем электропитания космических аппаратов на основе инверторно-трансформаторных преобразователей / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, В.Н. Школьный, С.Б. Сунцов, М.М. Черная // Электротехника. – 2016. – №12. – С. 26-33.
17. Загородских Е.В. Модуль заряда аккумуляторных батарей для космического применения / Е.В. Загородских, В.Н. Школьный, Ю.А. Шиняков, А.В. Осипов, М.П. Сухоруков // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 1. – С. 121–125.
18. Осипов А.В., Школьный В.Н., Шиняков Ю.А., Ярославцев Е.В., Шемолин И.С. Последовательный резонансный преобразователь для систем электропитания от аккумуляторов // Доклады ТУСУР. – 2017. – Т. 20, № 2. – С. 103–110.
19. Осипов А.В. Энергетически эффективные режимы работы преобразователя частоты с последовательно-параллельным резонансным контуром при стабилизации мощности на переменной нагрузке // Электротехника. – 2017. – № 6. – С. 70-76.
20. Сахаров М.С. Динамическая модель резонансного преобразователя с Т-образным контуром / М.С. Сахаров, А.В. Осипов // Научный вестник НГТУ. – 2017. – №4. – С.47-66.
21. Осипов А.В. Двухнаправленный вольтодобавочный преобразователь с активным выпрямителем для заряда-разряда аккумулятора в системах электропитания / А.В. Осипов, И.С. Шемолин, В.Н. Школьный, Р.А. Латыпов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 119–126.
22. Осипов А.В. Двухнаправленный вольтодобавочный преобразователь с мягким переключением для систем электропитания / А. В. Осипов, И.С. Шемолин, А.А. Лопатин, Р.А. Латыпов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 108–117.
23. Осипов А.В. Вольтодобавочный последовательный резонансный преобразователь с изменяемой структурой для систем электропитания / А.В. Осипов, Е.В. Ярославцев, Е.Ю. Буркин, В.В. Свиридов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – № 2. – С. 27–37.
24. Осипов А.В. Вольтодобавочный резонансный LCL-T преобразователь для автономных систем электропитания на возобновляемых источниках энергии / Осипов А.В., Запольский С.А. // Известия Томского политехнического университета. – 2018. – Т. 329. – № 3. – С. 77–78.
25. Осипов А.В. Определение характеристик фазовой подстройки частоты в последовательном резонансном преобразователе при широтно-импульсном регулировании / А.В. Осипов // Доклады

ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 111–116.

26. Осипов А.В. Резонансные преобразователи постоянного напряжения с кодо-импульсным регулированием / А.В. Осипов, И.М. Журавлев // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 97–102.

27. Журавлев И.М. Резонансный преобразователь энергии солнечной батареи в системе электропитания малого космического аппарата / И. М. Журавлев, А. В. Осипов // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 81–85.

28. Осипов А.В. Синтез двухчастотного тока параллельно-последовательным резонансным LCLC-преобразователем с многократной широтно-импульсной модуляцией / А.В. Осипов // Доклады ТУСУР. – 2021. – № 1. – С. 75–82.

29. Осипов А.В. Резонансный LCL-преобразователь с частотно-широотно-импульсным регулированием / А.В. Осипов, В.М. Рулевский // Доклады ТУСУР. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 77–83.

30. Шемолин И.С. Устройство заряда аккумуляторной батареи асимметричным током / И.С. Шемолин, И.В. Калашников, В.М. Рулевский, А.В. Осипов // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – № 2. – С. 57-60.

Статьи в зарубежных научных периодических изданиях

31. Osipov A.V. LCL-Resonant converter based on dual active bridge topology in solar energy applications / A.V. Osipov, Y.A. Shinyakov, V.N. Shcolnyi, M.S. Sakharov // Journal of aerospace technology and management. – 2017. – Vol. 9(2). – P. 248–254.

32. Osipov A.V. Energy-efficient operation modes of a frequency converter with a series-parallel resonant circuit under power stabilization at a variable load // Russian Electrical Engineering. – 2017. – Vol. 88. – Issue 6. – P. 381-387.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Диссертационная работа Осипова А.В. на тему «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий» соответствует требованиям «Положения требований о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемых к докторским диссертациям, является законченным самостоятельным научным исследованием, имеющим научную ценность. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 05.09.12 «Силовая электроника», а именно п.1 и п.2

1. Разработка научных основ создания схем и устройств силовой электроники, исследование свойств и принципов функционирования элементов схем и устройств.
2. Теоретический анализ и экспериментальные исследования процессов преобразования (выпрямления, инвертирования, импульсного, частотного и фазочастотного регулирования и т.п.) в устройствах силовой электроники с целью улучшения их технико-экономических и эксплуатационных характеристик.

Диссертация «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий» Осипова А.В. рекомендуется к защите на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 «Силовая электроника».

Заключение принято на заседании научно-исследовательского института «Автоматики и Электромеханики» ТУСУРа

Присутствовало на заседании 17 чел. Результаты голосования: «за» – 17 чел., «против» – нет, «воздержалось» – нет, протокол № 35 от 11.03.2022 г.

Директор НИИ АЭМ ТУСУР
к.т.н, доцент



Юдинцев А.Г.

Профессор кафедры КСУП ТУСУРа
д.т.н., доцент



Ганджа Т.В.