

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Осипова Александра Владимировича «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника

Актуальность темы исследования

Регулирование параметров нагрузки полупроводниковых преобразователей электрической энергии, как функциональное действие неизбежно сопровождается энергетическими потерями. В этой связи повышение энергетической эффективности регулируемых резонансных преобразователей электрической энергии, несомненно, представляет собой актуальную проблему, заслуживающую пристального внимания ученых и специалистов, занимающихся их разработкой и внедрением. Решение указанной проблемы применительно к рассматриваемым в диссертации резонансным преобразователям тесно связано с уменьшением интервалов рекуперации (возврата в первичный источник) части электрической энергии, приводящей к завышению потерь мощности. При этом важно отметить, что несогласованный режим работы преобразователя является причиной завышения не только статических потерь мощности, но и в значительной степени противодействует реализации мягкой коммутации его транзисторных ключей.

В диссертации Осипова А.В. проблема повышения энергетической эффективности регулируемых резонансных преобразователей решается путем использования свойства непрерывного параметрического преобразования импеданса нагрузки, реализуемого последовательно-параллельными топологиями резонансного контура. Наличие у таких топологий нескольких резонансных частот, имеющих разные импедансные свойства, открывает широкие возможности для формирования требуемого коэффициента передачи

тока и синтеза режимов регулирования выходных параметров преобразователя. Последовательно-параллельные резонансные преобразователи применяются в системах электропитания, в технологии индукционного нагрева при формировании двухчастотного тока для закалки деталей сложной поверхности и для согласования параметров преобразователя с сильнооточной удаленной нагрузкой. Несмотря на широко проводимые в нашей стране и за рубежом исследования, вопросы, как теории, так и практической реализации таких устройств остаются малоизученными. Поэтому тема диссертации Осипова А.В., посвященная решению указанных проблем, представляется актуальной.

Степень обоснованности и достоверности результатов и выводов

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

По теме диссертационного исследования опубликовано 75 научных работ, из которых 30 опубликовано в изданиях рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертаций, 16 публикаций в изданиях индексированных в международной базе данных Scopus. Новизну решений подтверждает 20 патентов РФ на изобретения и полезные модели. Результаты диссертации апробированы на 18 конференциях различного уровня. Внедрение результатов диссертации подтверждается приведенными в приложении к диссертации актами.

Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и одного приложения.

Во введении автор обосновывает актуальность темы, формулирует цель и направления исследований, научную новизну, практическую ценность, выносит на защиту положения.

В первой главе показано современное состояние исследований в области резонансных преобразователей, проведен анализ способов регулирования их выходных параметров. Рассмотрены последовательно-параллельные топологии резонансного преобразователя, показано влияние топологии на энергетическую эффективность. Сформулирована базовая концепция повышения энергетической эффективности резонансного преобразователя, основанная на параметрическом преобразовании импеданса нагрузки.

Во второй главе рассмотрены импульсные способы регулирования выходного напряжения последовательного резонансного преобразователя с непрерывной частотной подстройкой. Показаны энергетические преимущества такого регулирования, обусловленные минимизацией интервалов рекуперации и формированием благоприятных коммутационных условий переключения транзисторов. Определены энергетические характеристики при реализации предложенного широтно-импульсного регулирования напряжения, как инвертором, так и выпрямителем. Показано, что при регулировании выпрямителем активное сопротивление резонансного контура по переменному току и добротность являются функциями угла регулирования.

В третьей главе рассмотрены резонансные преобразователи последовательно-параллельной *LCL* топологии в режиме параметрической стабилизации выходного напряжения. Предложен принцип, согласно которому возмущения нагрузки компенсируются за счет импедансного преобразования резонансным *LCL* контуром, а нестабильность тока входного источника – импульсным регулированием. Показано, что свойство импедансного преобразования позволяет повысить энергетическую эффективность импульсного регулирования, так как компенсация изменений нагрузки осуществляется параметрически без введения интервалов рекуперации.

В четвертой главе проведено исследование резонансных преобразователей с двухчастотным выходным током, которые находят применение в индукционном нагреве деталей сложной формы поверхности. Показано, что

индуктор имеет разный импеданс на синтезируемых частотах, в результате чего потребление мощности на данных гармониках непропорционально и приводит к появлению искажений. Проведено исследование энергетической эффективности способов формирования двухчастотного тока с учетом нелинейного потребления синтезируемых гармоник. Предложен оригинальный способ коррекции частотных характеристик индуктора за счет импедансного преобразования, осуществляемого *LCLC*-контуром, приведены количественные оценки энергетических показателей.

В пятой главе рассмотрены способы согласования выходных параметров преобразователя с нагрузкой с помощью последовательно-параллельного резонансного контура. Показано, что *LCLC* топология позволяет получить требуемый коэффициент передачи тока на нижней резонансной частоте, на которой происходит частичная взаимная компенсация реактивной энергии последовательного и параллельного парциальных контуров. Проведен анализ регулируемого резонансного *LCLC* преобразователя в условиях изменения импеданса индуктора, рассмотрены режимы, близкие к параметрическим режимам стабилизации мощности.

В шестой главе обобщены результаты практической реализации предложенных регулируемых резонансных преобразователей. Показано, что разработанные резонансные преобразователи обеспечивают улучшенные энергетические характеристики при заданных режимах работы и экспериментально подтверждают теоретически полученные результаты.

В заключении подводятся итог проделанной работы, и формулируются основные результаты, полученные в диссертации.

Диссертация изложена на 327 страницах основного текста, содержит 191 рисунок, 14 таблиц, 1 приложение на 5 страницах. Автореферат отражает основные положения и результаты, представленные в диссертации.

Анализ решенных в диссертации вопросов и задач свидетельствует о соответствии ее темы и содержания специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

Научная новизна и практическая значимость результатов работы

В диссертации решен ряд научно-технических задач, направленных на повышение энергетической эффективности режимов регулирования резонансных преобразователей последовательных и последовательно-параллельных топологий. Полученные в работе результаты и выносимые положения, несомненно, обладают научной новизной. Наиболее значимые результаты состоят в следующем:

1. Предложена общая концепция улучшения энергетической эффективности резонансных преобразователей, основанная на синтезе режимов регулирования выходных параметров за счет комплексного применения импульсного регулирования и импедансного преобразования, осуществляемого последовательно-параллельным резонансным контуром.

2. Разработан способ частотно-широотно-импульсного регулирования напряжения последовательного резонансного преобразователя постоянного напряжения с фазовой подстройкой частоты, обеспечивающей минимизацию интервалов рекуперации энергии и мягкое включение транзисторов. Применение данного способа при регулировании величины выходного напряжения преобразователя на 50% обеспечивает увеличение его коэффициента мощности в 2 раза.

3. Разработан способ широко-импульсного регулирования коэффициента передачи резонансного преобразователя *LCL*-контуром, обеспечивающий жесткость регулировочной характеристики и мягкое включение транзисторов за счет фазовой коррекции напряжения активного выпрямителя. При глубине регулирования в $\sqrt{2}$ раз достигнуто уменьшение суммарного действующего тока инвертора и выпрямителя в 1,2 раза по отношению к току входного источника.

4. Предложен метод синтеза двухчастотного тока нагрузки многократной широко-импульсной модуляцией, реализуемый на основе резонансного преобразователя с последовательно-параллельным контуром, который путем формирования требуемых коэффициентов передачи компенсирует

непропорциональное потребление синтезируемых гармоник. Предложенный метод синтеза позволяет повысить энергетические показатели преобразователя по габаритной мощности на 30%, по коэффициенту мощности на 8,4%.

5. Разработан метод согласования резонансного инвертора с нагрузкой с помощью *LCLC*-контура, обеспечивающий при мягком включении транзисторных ключей и частотном регулировании в области нижней резонансной частоты, формирование интервала уменьшающегося тока инвертора. Применение данного метода в режиме стабилизации выходного тока при частотном регулировании с начальным коэффициентом передачи $K_I = 6$ обеспечивает снижение выходного тока инвертора в 1,4 раза.

6. Предложен метод параметрической стабилизации мощности резонансного преобразователя, базирующийся на формировании стабильного входного импеданса его резонансного контура при изменяющейся нагрузке. Предложенный метод позволяет минимизировать диапазон регулирования инвертора и его габаритную мощность. В частности предложенный метод стабилизации мощности позволил уменьшить габаритную мощность инвертора на 30% при изменении нагрузки в 2 раза.

Практическая ценность работы заключается в том, что предложенная концепция синтеза режимов работы резонансных преобразователей позволяет за счет импедансного преобразования нагрузки уменьшить статические потери и габаритную мощность преобразователя. Практическая значимость подтверждена участием автора в ряде научно-технических программ и контрактов, а также внедрением опытных образцов резонансных преобразователей на промышленных предприятиях и в учебном процессе.

Замечания по диссертационной работе

1. Предлагаемое в 3 главе широтно-импульсное регулирование с фазовым смещением правильнее было бы классифицировать как фазо-широтно-импульсное регулирование, учитывая, что одновременно меняется фаза и ширина импульсов напряжения выпрямителя.

2. В диссертации совершенно не рассмотрены алгоритмы подстройки частоты, необходимые для реализации предложенного частотно-широотно-импульсного регулирования напряжения.
3. Не понятно, в чем заключается преимущество исследуемых в 4 главе преобразователей на основе одного инвертора с многократной ШИМ перед системой, построенной на суммировании энергии двух инверторов разной частоты общим резонансным контуром?
4. Не ясно, почему при регулировании выходных параметров *LCL*-преобразователя отвергнут принцип подстройки частоты, эффективность которого доказана во 2 главе?
5. Присутствует ряд неудачных формулировок, например, «частота касания» стр. 244, «граничные условия ЧШИР» стр. 147.

Заключение по диссертационной работе

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что представленная диссертация представляет собой законченную научно-техническую работу, которая вносит существенный вклад в развитие теории регулирования выходных параметров резонансных преобразователей, а совокупность полученных результатов является решением проблемы повышения их энергетической эффективности. Отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают ценности диссертации.

Представленная диссертационная работа «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий» по уровню новизны и значимости полученных результатов соответствует требованиям п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления 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.

