

ОТЗЫВ

официального оппонента Голембиовского Юрия Мичиславовича, доктора технических наук, профессора кафедры «Системотехника и управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А. на диссертационную работу Осипова Александра Владимировича «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий», представленную на соискание учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

Актуальность темы исследования

Проблема повышения энергетической эффективности преобразователей электрической энергии для различных применений была, остаётся и, очевидно, ещё долгое время будет оставаться актуальной. Подтверждением этого факта является значительное количество научных исследований как отечественных, так и зарубежных учёных. Решаемые при этом задачи связаны, в основном, с тремя направлениями:

- совершенствование элементной базы силовой электроники (СЭ),
- развитие схемотехники преобразовательных устройств и систем,
- разработка методов, алгоритмов и программ управления указанными объектами.

Как правило, эти направления взаимосвязаны. Например, разработка новых схемных решений вызывает синтез соответствующих методов и алгоритмов управления.

Важным аспектом повышения технико-экономических показателей преобразовательных устройств является снижение потерь в ключевых элементах. Потери в полупроводниковых ключах являются основным сдерживающим фактором уменьшения массогабаритных показателей систем преобразования энергии, поскольку ограничивают возможность повышения частоты генерируемого преобразователями напряжения.

Одним из перспективных направлений с позиции энергоэффективности является интенсивно развивающаяся схемотехника резонансных преобразователей (РП). В таких устройствах сочетается снижение реактивной энергии, циркулирующей в системе, с мягким переключением транзисторов, что уменьшает потери в них.

В рецензируемой диссертационной работе задача повышения энергоэффективности резонансных инверторов решается в комплексе с учётом импедансных свойств сложного последовательно-параллельного контура и параметров управления: фазы, ширины и частоты импульсов управления.

Следует также отметить, что рассматриваемые в диссертации последовательно-параллельные схемы могут формировать в нагрузке двухчастотный ток, что расширяет область их применения.

На основании изложенного считаю, что тема диссертационной работы Осипова А.В., посвящённая разработке и исследованию энергоэффективных преобразователей, является актуальной и представляет несомненный интерес как в научном, так и в практическом планах.

Степень обоснованности и достоверности результатов и выводов

Все теоретические положения и выводы диссертационного исследования строго обоснованы корректным использованием математического аппарата, современных методов системного анализа и математического моделирования, что подтверждено экспериментальными исследованиями.

Основные результаты диссертации апробированы на международных и Всероссийских конференциях и опубликованы в зарубежных и отечественных изданиях. Приоритет проведённых исследований зафиксирован в целом ряде патентов на изобретения.

Критический анализ содержания диссертационной работы

Во введении обоснованы актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, даны сведения о её научной новизне и практической значимости, достоверности и апробации результатов. Изложены положения, выносимые на защиту, и рекомендации по использованию материалов диссертации для решения практических задач.

В первой главе представлены результаты аналитического обзора по материалам отечественных и зарубежных публикаций, рассмотрены принципы построения и схемотехника резонансных преобразователей различных классов и назначений, проанализированы способы регулирования резонансных преобразователей. По результатам анализа публикаций сформулированы нерешённые проблемы и намечены направления дальнейших исследований. Предложена концепция совместного преобразования нагрузки и импульсного регулирования с целью повышения энергетической эффективности режимов работы резонансных преобразователей.

Во второй главе изложена концепция широтно-импульсного регулирования с одновременной частотной подстройкой (ЧШИР) в резонансных преобразователях постоянного напряжения. Доказано, что применение ЧШИР улучшает энергетические показатели по сравнению с фазовым регулированием за счёт замены интервала рекуперации интервалом закорачивания тока контура. Такое управление создаёт условия снижения потерь за счёт переключения транзисторов при нуле напряжения на них, а также при нуле тока в одной из стоек инвертора.

В данной главе детально показано, что при регулировании выпрямителем добротность и активное сопротивление резонансного контура являются функциями угла регулирования. Получены и проанализированы динамические характеристики резонансного преобразователя при воздействии амплитуды и частоты напряжения в условиях больших частотных расстройек.

Важно отметить, что автором определены области эффективного применения ЧШИР для режима стабилизации напряжения, а также предложены энергетически эффективные режимы использования вольтодобавочной структуры резонансного преобразователя.

В третьей главе приводятся результаты исследования параметрической стабилизации требуемого режима работы резонансных преобразователей последовательно-параллельных топологий путём импедансного преобразования параметров нагрузки. При импедансном преобразовании компенсация изменений нагрузки осуществляется за счёт свойств самого резонансного контура без импульсного регулирования, повышающего ток резонансного контура из-за наличия интервалов его закорачивания.

Важным аспектом исследования является обеспечение стабильного выходного напряжения при питании от источника тока, например, от солнечной батареи, а также разработка преобразователя с активным выпрямителем. Согласно предложенной автором концепции стабилизация напряжения при изменении нагрузки компенсируется резонансным LCL контуром, а нестабильность тока входного источника питания – импульсным регулированием.

Проведён также анализ способов управления резонансным преобразователем с использованием широтно-импульсного и фазового регулирования для стабилизации выходного напряжения. Исследованы динамические свойства резонансного LCL преобразователя при изменении нагрузки.

Четвёртая глава посвящена синтезу двухчастотного выходного тока резонансными LCLC преобразователями. Такие преобразователи актуальны для индукционного нагрева под закалку деталей сложной формы, а также в плавильных агрегатах.

Проведено исследование энергетической эффективности способов формирования и регулирования двухчастотного тока с учётом разного импеданса индуктора на различающихся частотах. Предложены подходы к коррекции частотных характеристик резонансного преобразователя за счёт импедансного преобразования, реализуемого LCLC контуром. Приведены количественные оценки энергетических показателей при коррекции.

В пятой главе представлены результаты исследования резонансного LCLC преобразователя в режиме согласования его выходных параметров с нагрузкой. Топология LCLC представляет собой дальнейшее развитие LCL и LLC топологий и, как показали полученные автором результаты, вызывают появление третьей нижней резонансной частоты, которая и придаёт инвертору свойства импедансного преобразователя.

Преобразователи LCLC типа рекомендуются для процессов индукционного нагрева, поскольку из-за явления частичной взаимной компенсации реактивной энергии между последовательным и параллельным резонансными контурами, снижается величина входного тока, что позволяет исключить применение высоковольтного входного трансформатора или, по крайней мере, существенно снизить его массогабаритные показатели.

Проведённый автором анализ режимов резонансного LCLC преобразователя даёт необходимые рекомендации для проектирования источников питания индукционных установок.

Шестая глава посвящена практической реализации энергетически эффективных режимов работы резонансных преобразователей. Дано описание разработанных макетных и опытных образцов для питания синтезатора частот космического аппарата, вольтодобавочного резонансного преобразователя с к.п.д. 98,2%, а также LCLC преобразователя для термической обработки, использующий предложенный автором режим параметрической стабилизации мощности.

Получены и проанализированы экспериментальные энергетические характеристики, подтверждающие теоретические результаты имитационного моделирования. Расхождение расчётных и экспериментальных результатов составляет менее 4% для систем индукционного нагрева, а для преобразователей постоянного напряжения не более 9%.

Анализ предложенных в диссертационной работе идей, поставленных вопросов и решённых задач свидетельствует о соответствии её темы и содержания формуле специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

Считаю, что представленная диссертационная работа свидетельствует о высоком научном уровне выполненного исследования в области создания новых энергоэффективных преобразовательных устройств.

Научная новизна и практическая значимость результатов диссертации

Из материалов диссертации и публикаций автора следует, что Осиповым А.В. успешно решён комплекс теоретических и практических задач, связанных с разработкой новых топологий энергетически эффективных резонансных преобразователей и режимов их работы. Считаю, что приведённые ниже результаты исследований действительно обладают научной новизной и практической ценностью.

1. Предложена обобщённая 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 частотно-широотно-импульсного регулирования (ЧШИР) выходных параметров резонансного преобразователя постоянного напряжения с активным выпрямителем, отличающийся адаптивной подстройкой частоты, реализуемой по условию минимизации интервалов рекуперации энергии.
3. Установлено, что при реализации ЧШИР активным выпрямителем происходит изменение его входного сопротивления и приведенного сопротивления резонансного контура, приводящее к увеличению добротности и уменьшению требуемой величины частотной подстройки.
4. Разработан способ широко-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.
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 широко-импульсной модуляции, отличающийся компенсацией вносимых нагрузкой частотных искажений импедансным преобразованием, осуществляемым резонансным контуром с разными коэффициентами передачи тока на синтезируемых частотах.
7. Предложен способ согласования выходных параметров регулируемого резонансного инвертора с нагрузкой, отличающийся настройкой $LCLC$ -контура на нижнюю резонансную частоту, в области которой за счет импедансного преобразования формируется область увеличивающегося коэффициента передачи тока резонансного контура.
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 диссертационной работы состоит в развитии схемотехники резонансных инверторов, заключающемся в том, что предложены новые LCL и $LCLC$ преобразователи и широко-импульсный способ их регулирования, совмещенный с частотной подстройкой. С практической точки зрения это означает минимизацию тока в резонансном контуре и снижение потерь в ключевых элементах, исключение необходимости применения согласующего трансформатора, что приводит к уменьшению массогабаритных показателей системы преобразования энергии и повышению её КПД.

Практическая значимость работы подтверждена участием автора в ряде государственных программ и контрактов, а также актами внедрения опытных образцов резонансных преобразователей.

Публикации и апробация работы

Основные результаты, положения и выводы диссертационного исследования были изложены в докладах на 18 международных, всероссийских и региональных конференциях, опубликованы в 75 научных трудах, в том числе 30 статей в журналах из перечня ВАК РФ, 16 публикаций, индексируемых в базе SCOPUS, 20 патентов на изобретения и полезные модели РФ.

Замечания и дискуссионные положения

1. В работе не исследован вопрос о чувствительности рассмотренных преобразователей с ЧШИР к разбросу параметров элементов его силовой части и моментов подачи импульсов управления на транзисторы.
2. В главе 4 дан исчерпывающий анализ LCLC резонансных преобразователей с двухчастотным выходным током, но нигде не пояснено, почему выбор остановился на двухчастотных системах, а не на более общем подходе – *n*-частотных преобразователях?
3. При создании мощных преобразовательных источников электропитания часто возникает необходимость организации параллельной работы независимых модулей. Параллельное включение имеет целый ряд преимуществ: повышение надёжности системы при существенно меньших затратах на резервирование, повышение эффективности использования силового оборудования с одновременной экономией ресурса работоспособности силовых ключей, а в ряде применений снижение суммарной установленной мощности силового оборудования. С этой точки зрения исследование параллельной работы LCL и LCLC резонансных преобразователей представляло бы несомненный теоретический и практический интерес, связанный с выяснением взаимного влияния резонансных контуров и режимов работы силовых ключей. Этот аспект в рецензируемой диссертационной работе не рассматривался.
4. В тексте диссертации и в заключении говорится о том, что сформулированы практические рекомендации для проектирования энергетически эффективных преобразовательных систем на основе резонансных преобразователей. Однако эти рекомендации в работе не представлены в явном виде, что затрудняет их применение в инженерных расчётах.
5. В работе не акцентировано внимание на диапазоне изменения нагрузки, при котором обеспечивается стабилизация напряжения за счёт импедансного преобразования.

Заключение по диссертационной работе

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы Осипова А.В., которая, несомненно, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, результаты которой

создают основу для разработки энергоэффективных устройств и систем силовой электроники в области резонансных преобразователей различных назначений. Совокупность полученных автором результатов несомненно является решением научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение.

Тематика диссертационного исследования связана с работами, выполненными автором в рамках федеральных целевых программ и правительственных заданий.

Работа прошла апробацию на многих зарубежных и российских конференциях.

Автореферат полностью отражает основные положения и результаты, изложенные в диссертации.

Представленная диссертационная работа «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных топологий» по научной новизне, актуальности решённых задач, значимости полученных теоретических и практических результатов соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении учёных степеней» от 24.09.2013г. №842, а её автор Осипов Александр Владимирович заслуживает присуждения учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – «Силовая электроника»

Официальный оппонент
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Системотехника
и управление в технических системах»
СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Голембиовский
Юрий Мичиславович
30.05.2022г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Почтовый индекс 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77.

Контактный телефон: (8452) 99-88-42.

Адрес электронной почты: utma_37@mail.ru

Подпись Голембиовского Ю.М. Заверяю
Учёный секретарь Учёного совета СГТУ
имени Гагарина Ю.А.



Н.В. Тищенко