

«УТВЕРЖДАЮ»

Помощник проректора по научной  
работе ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет  
«МЭИ» д.т.н.,  
Волков Александр Викторович

« 14 »

2022 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу  
Осипова Александра Владимировича «Энергетически эффективные  
регулируемые резонансные преобразователи последовательных и  
последовательно-параллельных топологий», представленной на соискание  
ученой степени доктора технических наук  
по специальности 05.09.12 – Силовая электроника

### Актуальность работы

Проблема создания высокоэффективных резонансных преобразователей становится все более актуальной, так как в преобразователях данного типа происходит компенсация реактивной энергии звена переменного тока (в частности индуктивности рассеяния трансформатора) резонансным конденсатором и простое формирование благоприятных коммутационных режимов работы транзисторов, не требующее применения снабберных цепей. При этом реализация регулирования выходных параметров резонансного преобразователя отличается сложностью, в частности продиктована необходимостью изменения сразу нескольких параметров импульсов, подаваемых на контур (фазы, ширины, частоты). Это затрудняет формирование общей концепции

эффективного регулирования, которая в настоящее время отсутствует. Предлагаемый в диссертации подход, заключающийся в использовании явления параметрического преобразовании импеданса нагрузки для повышения энергетической эффективности, является новым и актуальным.

Актуальность решаемых в диссертации задач также подтверждается ее тесной связью с научно-техническими программами «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России», и проектами, выполненными в рамках постановления Правительства № 218 от 09.04.2010 г. Таким образом, диссертационная работа А.В. Осипова, посвященная решению перечисленных проблем, представляет безусловный интерес и является актуальной.

### **Объем и содержание диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы и одного приложения. Объем работы составляет 327 страниц, содержит 191 рисунок и 14 таблиц. Содержание диссертации отражено в автореферате и научных работах соискателя.

*Во введении* рассмотрено состояние проблемы, обоснована актуальность, сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, изложена научная новизна полученных результатов и их практическая значимость, определены научные положения.

*В первой главе* рассмотрены факторы, определяющие энергетическую эффективность регулируемых резонансных преобразователей. Предложена концепция повышения энергетической эффективности, основанная на применении импедансного преобразования нагрузки, осуществляемого последовательно-параллельными топологиями резонансного контура.

*Во второй главе* рассмотрены способы импульсного регулирования выходного напряжения резонансного преобразователя с активным выпрямителем при адаптивной подстройке частоты, осуществляемой по условию минимизации фазы тока резонансного контура.



В третьей главе предложен регулируемый  $LCL$  преобразователь с активным выпрямителем, реализующий режим параметрической стабилизации выходного напряжения при изменении нагрузки. Разработаны способы регулирования коэффициента передачи  $LCL$  преобразователя, обеспечивающие его стабильность во всем диапазоне и ZVS включение транзисторов.

В четвертой главе рассмотрены резонансные  $LCLC$ -преобразователи в режиме формирования двухчастотного тока нагрузки. Получены энергетические характеристики, показана возможность компенсации вносимых индуктором частотных искажений с помощью коэффициентов передачи тока  $LCLC$ -контура на синтезируемых частотах.

В пятой главе рассмотрены режимы согласования параметров преобразователя с нагрузкой  $LCLC$ -контуром, предложен способ согласования в области нижней резонансной частоты. Синтезирован режим параметрической стабилизации мощности на изменяющейся нагрузке.

В шестой главе представлены результаты практической реализации и примеры эффективного применения разработанных регулируемых резонансных преобразователей в электротехнических системах.

### **Научная новизна исследований**

Научная новизна проведенных диссертантом исследований заключается в разработке ряда способов повышения энергетической эффективности на основе базовой концепции применения параметрического импедансного преобразования. Результаты, полученные в данной работе, имеют большую научную и практическую ценность.

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 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 полученных результатов для науки и производства**

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработанных способах применения предложенной в п.1 концепции повышения энергетической эффективности. При этом основной акцент сделан на минимизацию статических потерь в преобразователе за счет непрерывного коэффициента передачи резонансного контура. Научные результаты работы использованы при разработке резонансных преобразователей различного назначения, о чем свидетельствуют акты практического применения, представленные в приложении.

### **Достоверность результатов работы и рекомендации по их использованию**

Достоверность результатов работы подтверждена результатами экспериментальных исследований и внедрением опытных образцов в производство. Результаты диссертации целесообразно использовать при создании широкого ряда систем силовой электроники: для преобразования энергии, вырабатываемой солнечными модулями в системах электроснабжения космических аппаратов, в преобразователях заряда-разряда аккумуляторных батарей. Кроме того, применение результатов актуально в системах индукционного нагрева, в частности в процессах

двухчастотного индукционного нагрева и в системах с удаленным высокоточным соединением индуктора с преобразователем.

Проведенные исследования могут получить дальнейшее развитие в научно-исследовательских институтах и ВУЗах работающих над созданием высокочастотных резонансных преобразователей.

### **Замечания по работе**

По диссертации имеются следующие замечания и дискуссионные предложения:

1. В работе не проведено исследование влияния паразитных параметров согласующего трансформатора на режимы работы последовательно-параллельного резонансного преобразователя.
2. Из материалов диссертации не понятно, как и по каким критериям выбирается добротность резонансного контура в последовательном резонансном преобразователе?
3. При анализе характеристик резонансного преобразователя для систем индукционного нагрева имело смысл рассмотреть изменение не только активной, но и индуктивной составляющей индуктора.
4. Применение для формирования требуемого коэффициента передачи тока вместо LCL-топологии более сложной LCLC-топологии с дополнительным конденсатором, очевидно, увеличит массогабаритные параметры резонансного контура.
5. Непонятно, чем обусловлен выбор диапазона изменения нагрузки при анализе режима стабилизации мощности (рис. 5.30)?

### **Заключение**

В целом, несмотря на сделанные замечания, диссертационная работа Осипова А.В. «Энергетически эффективные регулируемые резонансные преобразователи последовательных и последовательно-параллельных

топологий», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук, является законченной, содержит новые научные и практические результаты и соответствует предъявляемым ВАК требованиям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.09.12 – Силовая электроника.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры «Промышленная электроника» 09 июня 2021 года (протокол №9).

Заведующий кафедрой промышленной  
промышленной электроники ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»  
д.т.н., доцент

/Асташев Михаил Георгиевич

14.06.2021г.

Подпись Асташева М.Г. заверяю.

Заместитель начальника по работе с персоналом

/Полева Людмила Ивановна



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

111250, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Лефортово, ул. Красноказарменная, д. 14, стр. 1.

+7 495 362-75-60

факс +7 495 362-89-38

universe@mpei.ac.ru