

На правах рукописи



Татуйко Павел Станиславович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Брянск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Брянский государственный технический университет» на кафедре «Электронные, радиоэлектронные и электротехнические системы».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Федяева Галина Анатольевна

Официальные оппоненты: **Панфилов Дмитрий Иванович**
доктор технических наук, профессор
Акционерное общество «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы, научный руководитель

Фадейкин Тимофей Николаевич
кандидат технических наук, доцент
ОАО «РЖД», Проектно-конструкторское бюро локомотивного хозяйства, ведущий конструктор

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Защита диссертации состоится **«23» июня 2022 г.** в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 218.005.02, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр.9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ (МИИТ) и на сайте www.miit.ru.

Автореферат разослан «_____» 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Субханвердиев Камиль Субханвердиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Быстрые темпы роста современной промышленности, а также стремительное развитие систем электродвижения, электроэнергетических комплексов и систем приводят к росту требований, предъявляемых к системам электропитания для устройств радиоэлектронной аппаратуры, к эффективности использования электрической энергии и качеству питающей сети. Задачи увеличения эффективности, производительности, уменьшения затрат потребляемой энергии, повышения плотности монтажа, снижения массогабаритных показателей систем электроснабжения транспортных средств являются наиболее актуальными.

Для обеспечения требуемым стабилизированным напряжением цепей электропитания систем управления силовыми преобразователями электрифицированного транспорта используются импульсные источники вторичного электропитания, обеспечивающие гальваническую развязку между силовой цепью и цепью стабилизированного напряжения. Работа данных устройств основана на принципе высокочастотного преобразования электрической энергии. Однако повышение частоты коммутации влечёт за собой повышение динамических потерь на токопроводящих элементах, участвующих в преобразовании электрической энергии (транзисторы, трансформатор, диоды и т.д.). Возросшие потери вызывают нагрев элементов, в связи с чем требуется обеспечение теплоотвода и, как следствие, наблюдается увеличение массогабаритных показателей.

Использование резонансных топологий импульсных преобразователей позволяет существенно снизить динамические потери на полупроводниковых силовых ключах, повысить удельные характеристики импульсных источников вторичного электропитания различных видов электрифицированного транспорта, а для гибридных транспортных средств – обеспечивает повышение энергоэффективности систем заряда тяговых аккумуляторов.

Однако необходимо отметить, что традиционные решения (реализуемые посредством применения традиционных материалов, устройств, принципов

теплоотвода и использования современной компонентной базы), обеспечивают требуемый положительный эффект при мощности систем электротранспорта до 500...1000 кВт. При более высоких уровнях мощности происходит кратное увеличение значений масс и объёмов систем охлаждения, что снижает эксплуатационные показатели систем электрооборудования мощных наземных, морских и воздушных транспортных средств.

В этом случае необходим принципиально иной подход: применение высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) технологий криогенного охлаждения при создании перспективных систем электротранспорта позволит добиться снижения их массы и объёма, приведёт к повышению удельных энергетических характеристик, росту производительности и увеличению эффективности преобразования энергии.

Степень разработанности темы. Исследованиями в области повышения энергоэффективности преобразователей электрической энергии на основе резонансных импульсных топологий и изучением ВТСП-технологий для систем электродвижения занимались такие учёные, как Г.А. Дубенский, М.П. Бадёр, Г.А. Белов, Р.И. Ильясов, К.Л. Ковалёв, Ю.И. Кован, С-М.А. Конеев, В.И. Мелешин, , Ya Lui, Alex Dumais, Christophe Basso, Silvio de Simone, Bo Yang и другие учёные.

Цель диссертационной работы – повышение энергоэффективности систем электроснабжения транспорта на основе применения резонансной топологии импульсных статических преобразователей и анализ возможности функционирования полупроводниковых компонентов статических преобразователей в криогенном контуре электродвижения.

Задачи исследования

1. Анализ тенденций развития систем электродвижения и основных направлений повышения энергоэффективности электроснабжения транспортных средств.
2. Аналитический расчёт и исследование режимов работы основных типов резонансных преобразователей, выбор топологии преобразователя наиболее

целесообразной для транспортных средств.

3. Разработка методики расчёта и компьютерного имитационного моделирования полумостового резонансного LLC-преобразователя.

4. Разработка методики оценки гистерезиса выходной ёмкости МОП-транзистора, влияющего на функционирование LLC-преобразователя.

5. Проведение теоретических и экспериментальных исследований в области определения характеристик элементной базы полупроводниковых преобразователей при функционировании в среде жидкого азота.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- произведён аналитический расчёт и определение режимов работы резонансных преобразователей с последовательным резонансным LC контуром, параллельным резонансным LC контуром, последовательно-параллельным резонансным LCC контуром и последовательно-параллельным резонансным LLC контуром, выявлены особенности функционирования, определяющие применение данных топологий в составе систем электродвижения, в частности, в составе источников вторичного электропитания;

- обосновано, что для использования в составе источников вторичного электропитания транспортных средств наиболее предпочтительным является резонансный преобразователь с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром;

- разработана методика расчёта и моделирования резонансного преобразователя с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром и методика оценки гистерезиса выходной ёмкости MOSFET-, SiC- и GaN-транзисторов, влияющего на функционирование резонансного преобразователя;

- исследованы характеристики силовых полупроводниковых ключей при работе в среде жидкого азота, произведён аналитический расчёт и выявлена корреляция с эмпирическими данными; определены типы полупроводниковых ключей, на параметры которых криогенные температуры влияют наилучшим образом и которые могут быть использованы в системе электроснабжения транспортного средства, функционирующей в едином криогенном контуре.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Выполнен анализ и исследованы свойства основных типов резонансных полупроводниковых преобразователей, результаты исследования определяют тип и структуру импульсного преобразователя, применение которого в составе электрооборудования транспорта наиболее целесообразно и позволяет повысить энергоэффективность источников вторичного электропитания систем электроснабжения транспортных средств.

2. Разработана методика параметрического синтеза резонансного преобразователя с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром и произведена оценка гистерезиса выходной ёмкости MOSFET-, SiC- и GaN-транзисторов.

3. Результаты проведённых исследований электронной компонентной базы определяют состав изделий, применение которых в коммутационном оборудовании и преобразовательной технике для систем электродвижения с криогенным охлаждением оказывается возможным.

4. Результаты исследования использованы при разработке концепции развития силовой компонентной базы и преобразовательной техники для применения в системах ВТСП-электродвижения при выполнении аванпроекта по заданию Фонда перспективных исследований, договор №6/164/2019-2020ав.

5. Результаты исследования использованы при разработке модулей питания класса AC/DC при выполнении опытно-конструкторской работы по заданию Министерства промышленности и торговли Российской Федерации, ГК №16411.4432017.11.112.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались теоретические и эмпирические методы исследования, базирующиеся на фундаментальных положениях теории электрического преобразования энергии, теории сверхпроводимости, теории цепей, а также методы компьютерного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Тенденции развития систем электродвижения и основные направления повышения энергоэффективности электроснабжения транспортных средств.

2. Результаты аналитического расчёта основных типов полупроводниковых резонансных преобразователей напряжения и выявленные на основе сравнения особенности их применения в составе электрооборудования транспорта.

3. Методика расчёта и компьютерного моделирования резонансного преобразователя с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром и результаты оценки гистерезиса выходной ёмкости MOSFET-, SiC- и GaN-транзисторов, влияющего на функционирование резонансного преобразователя.

4. Результаты исследования характеристик и анализа эмпирических зависимостей параметров элементной базы полупроводникового преобразователя транспортного средства при функционировании в среде жидкого азота.

Степень достоверность и апробация полученных результатов обеспечивается корректностью принятых допущений при анализе резонансных преобразователей, удовлетворительным совпадением результатов расчёта на имитационных компьютерных моделях, выполненных в программных комплексах LTSpice, Matlab/Simulink и аналитического расчёта по предложенной методике, применением методов натурного эксперимента, а также отсутствием противоречий результатов экспериментальных исследований с данными, опубликованными в научной литературе.

Основные положения научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X и XI научно-технической конференции молодых специалистов по радиоэлектронике (2017, 2018 г., ОАО «Авангард» г. Санкт-Петербург), XIV научно-технической конференции «Системы и источники вторичного электропитания и элементная база для них» (2017 г., АО «ГК «Электронинвест» г. Москва), I и II научно-практической конференции с международным участием «САПР и моделирование в

современной электронике» (2017, 2018 г., БГТУ г. Брянск), при проведении круглого стола «Развитие силовой электроники и преобразовательной техники для систем электродвижения на основе эффектов высокотемпературной сверхпроводимости» (2019, ОАО «Авангард» г. Санкт-Петербург), международной научной конференции «СУММА» (Системы Управления, Математическое Моделирование и Автоматизация в промышленности и энергетике) (2019 г., ЛГТУ г. Липецк), на семинаре ассоциации ЭлектроАгроПром (2019 г.); являюсь лауреатом всероссийского конкурса «Инновационная электроника» (2018 г., ЦНИИ Электроника г. Санкт-Петербург), финалистом второго российско-китайского конкурса индустриальных инноваций INNOVATION AWARDS, удостоен премии В.П. Ковешникова ОАО «Авангард» за разработку инновационной продукции по направлению Источники вторичного питания.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы, включающего 89 наименований, и трёх приложений. Работа содержит 140 страниц основного текста, включая 66 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы и дана краткая характеристика диссертационной работы.

В первой главе произведён анализ тенденций развития систем электродвижения и путей повышения энергоэффективности электроснабжения транспортных средств, определено, что совершенствование технологий электродвижения наземного, воздушного и морского транспорта является приоритетным направлением развития отечественной и мировой промышленности; установлено, что применение технологий высокотемпературной сверхпроводимости и криогенного охлаждения преобразовательной техники в системах электродвижения позволяет реализовывать мощные исполнительные механизмы, работающие в диапазоне

нескольких единиц-десятков мегаватт с высокими удельными массогабаритными характеристиками.

Энергоэффективность работы систем электроснабжения транспортных средств во многом определяется эффективностью работы полупроводниковых преобразователей электрической энергии, основные направления повышения энергоэффективности:

- увеличение рабочего напряжения, приводящее к снижению потребляемого тока и потерь в проводниках;
- снижение потерь в преобразователях за счёт использования мягкой коммутации полупроводниковых вентилей;
- уменьшение потерь в преобразователях за счёт улучшения электронной компонентной базы;
- размещение электрооборудования транспортных систем (для высоких диапазонов мощностей) в криогенной среде.

Во второй главе получены аналитические выражения для определения режимов работы основных типов резонансных преобразователей (РП) при различных значениях величины нагрузки и частоты коммутации полупроводниковых ключей. Выявлено, что основным способом регулирования выходного напряжения в системах, построенных по принципу резонансного преобразования, является частотное управление. В момент времени, когда величина индуктивного сопротивления равна величине ёмкостного сопротивления, возникает требуемый для правильного функционирования преобразователя эффект резонанса.

В работе был произведён аналитический расчёт и определение режимов работы основных типов РП. Выявлено, что для преобразователей с последовательным резонансным LC контуром при малых нагрузках практически невозможна регулировка выходного напряжения. Теоретически, частота коммутации силовых полупроводниковых ключей должна быть бесконечной, чтобы регулировать выходное напряжение преобразователя при работе на холостом ходу.

Для РП с параллельным резонансным LC контуром отсутствует проблема работы с малой нагрузкой, однако существует проблема, связанная с тем, что в процессе работы в резонансном контуре осуществляется циркуляция большой реактивной мощности, ввиду чего присутствуют большие потери при выключении силовых ключей даже при малой нагрузке.

РП с последовательно-параллельным резонансным LCC контуром является комбинацией последовательного и параллельного резонансных контуров и демонстрирует характеристики, свойственные данным топологиям преобразователей. При работе РП в режиме, близком к режиму холостого хода, РП работает как преобразователь с параллельным LC резонансным контуром. При увеличении нагрузки данный преобразователь начинает работать как преобразователь с последовательным LC резонансным контуром.

Несмотря на то, что РП преобразователь с последовательно-параллельным LCC резонансным контуром способен функционировать при малой величине нагрузки, сохраняя выходное напряжение в заданном диапазоне значений, величина реактивной мощности, циркулирующей в резонансном контуре, всё ещё оказывает существенное влияние на эффективность устройства, особенно при работе на холостом ходу.

Выявленные особенности функционирования описанных выше РП ограничивают их применение в составе систем электроснабжения транспортных средств. Данные проблемы решены в РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром. Определено, что РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром способен функционировать при малой величине нагрузки, сохраняя выходное напряжение в заданном диапазоне значений. Также как при полной нагрузке, так и в режиме работы, близком к режиму холостого хода, построенный по данной топологии РП имеет высокие значения коэффициента полезного действия при широком диапазоне входных напряжений питающей сети.

Определено, что импеданс РП с LLC колебательным контуром определяется следующим выражением:

$$|Z| = Z_0 Q \sqrt{\frac{(1+A_L)^2 \left[1 - \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right)^2\right]^2 + \frac{1}{Q^2} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \cdot \frac{A_L}{A_L+1} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}{1 + \left[Q \left(\frac{\omega_0}{\omega}\right) (1+A_L)\right]^2}} \quad (1)$$

где Z_0 – импеданс контура на резонансной частоте, Q – добротность резонансного контура, определяемая параметрами компонентов резонансного контура и величиной нагрузки, ω – частота коммутации ключей, ω_0 – резонансная частота колебательного контура, A_L – коэффициент, равный отношению величины индуктивности намагничивания к величине индуктивности резонансного дросселя.

График зависимости величины передаточной функции РП с последовательно-параллельным LLC контуром от частоты коммутации полупроводниковых ключей при различных значениях нагрузки представлен на рисунке 1.

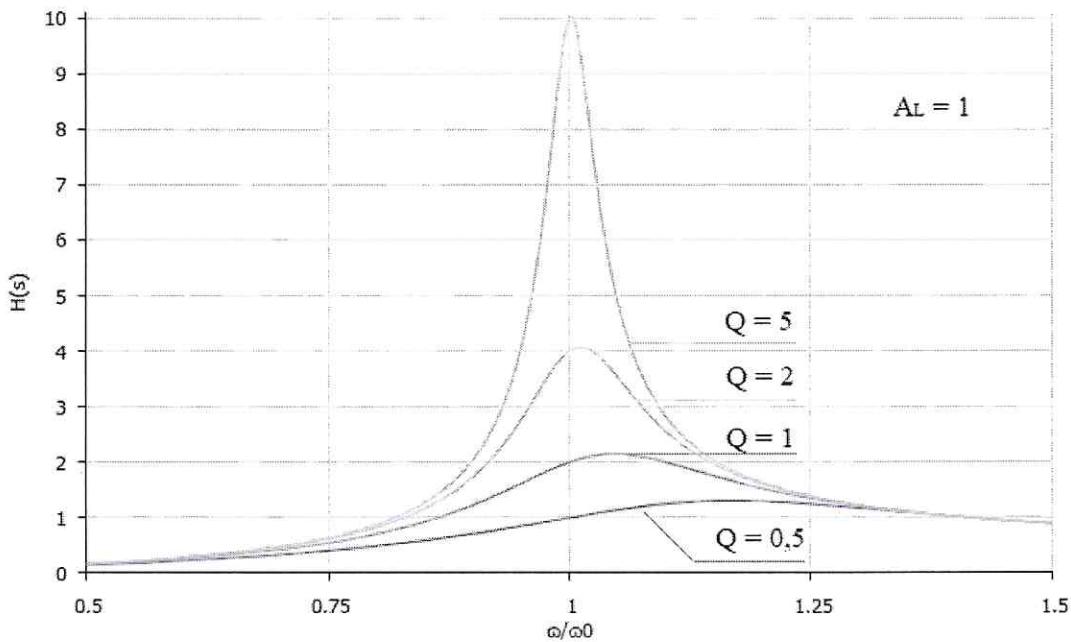


Рисунок 1. Зависимость передаточной функции РП с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром от частоты коммутации при $A_L=1$

При номинальной нагрузке преобразователь функционирует на резонансной частоте ($\omega = \omega_0$). В режиме работы, близком к режиму холостого хода ($Q=0,5$), рабочая частота преобразователя увеличивается, что соответствует экстремуму графика передаточной характеристики. Диапазон рабочих частот РП определяется коэффициентом A_L , который характеризует реакцию преобразователя на изменение величины нагрузки. При малом значении коэффициента A_L при

изменении режима работы от номинального до режима близкого к холостому ходу, наблюдается существенное увеличение частоты коммутации ключей, в то время как при большом значении коэффициента A_L рабочий диапазон частот оказывается сильно ограничен, реакция передаточной функции на изменение нагрузки существенно увеличивается. Для практического применения приемлемые режимы работы наблюдаются при нахождении коэффициента A_L в диапазоне 0,125...0,5. Графики зависимости величины значений передаточной функции от частоты коммутации и нагрузки при значениях параметра $A_L = 0, A_L = 0,5, A_L = 1, A_L = 2$ приведены на рисунке 2.

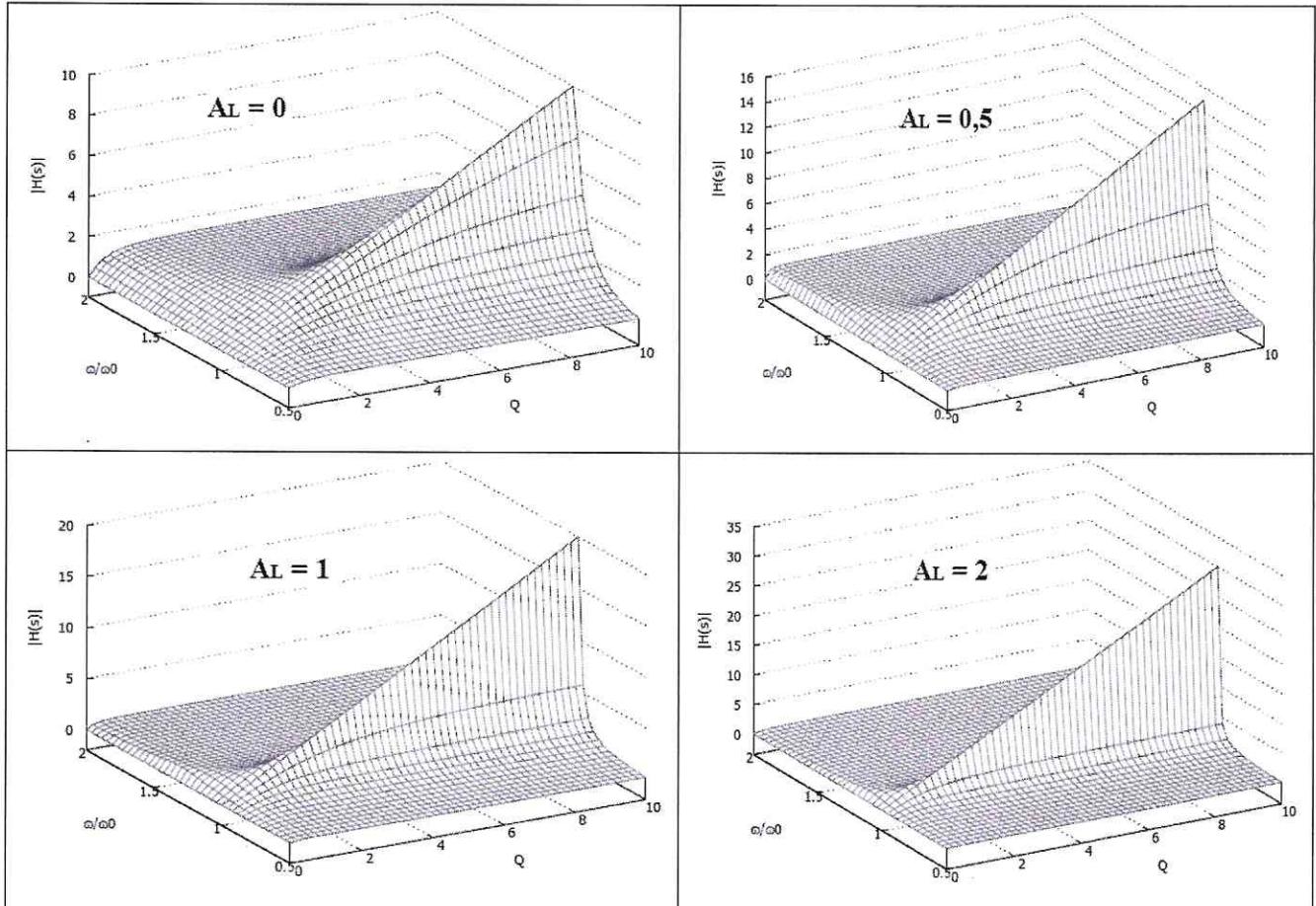


Рисунок 2. Зависимость передаточной функции последовательно-параллельного LLC резонансного контура от величины нагрузки и частоты коммутации ключей

В третьей главе с целью более глубокого изучения топологии полумостового преобразователя с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром были рассмотрены процессы, протекающие при полной нагрузке преобразователя, работающего на резонансной частоте.

Разработана методика аналитического расчёта полумостового резонансного преобразователя с последовательно-параллельным резонансным LLC контуром, выполнен параметрический синтез и осуществлено имитационное компьютерное моделирование данного преобразователя в среде LTSpice. Компьютерная модель полумостового резонансного LLC преобразователя представлена на рисунке 3.

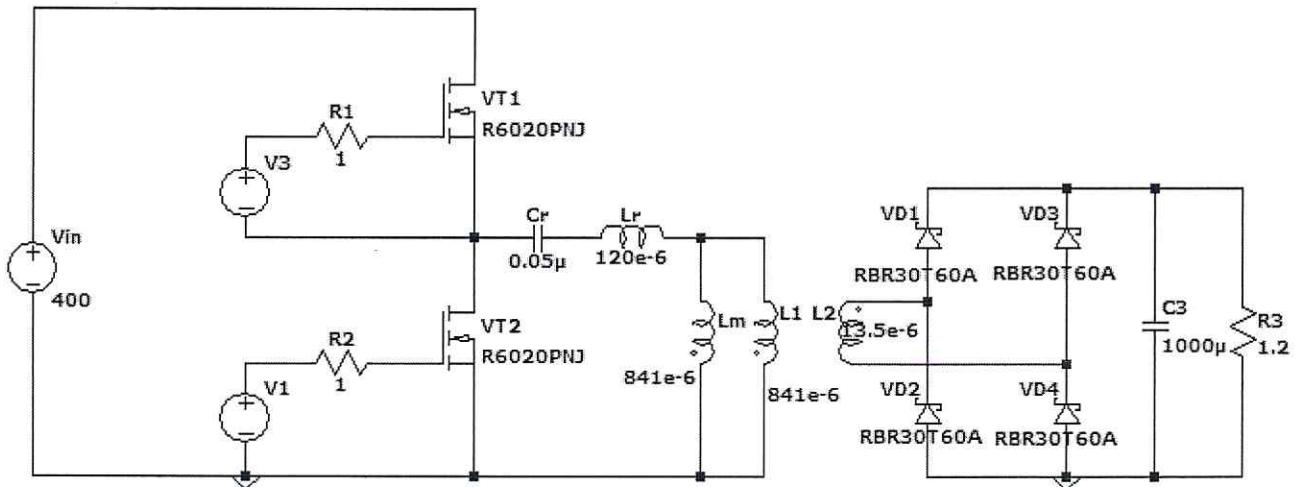


Рисунок 3. Компьютерная модель полумостового резонансного LLC преобразователя

На рисунке 4 приведён график выходного сигнала напряжения и тока полумостового резонансного LLC преобразователя, из которого видно, что напряжение стабилизируется на уровне +24 В при выходном токе 20 А, что соответствует исходным требованиям, предъявляемым при расчёте. Результаты моделирования показывают, что полумостовой резонансный LLC-преобразователь обладает коэффициентом полезного действия 97 %, низкими электромагнитными помехами и соответствует эксплуатационным и техническим требованиям для источников электропитания систем управления силовыми преобразователями электрифицированного транспорта. Он может рассматриваться также как прототип преобразователя более высокой мощности для систем заряда тяговых аккумуляторов гибридных транспортных средств.

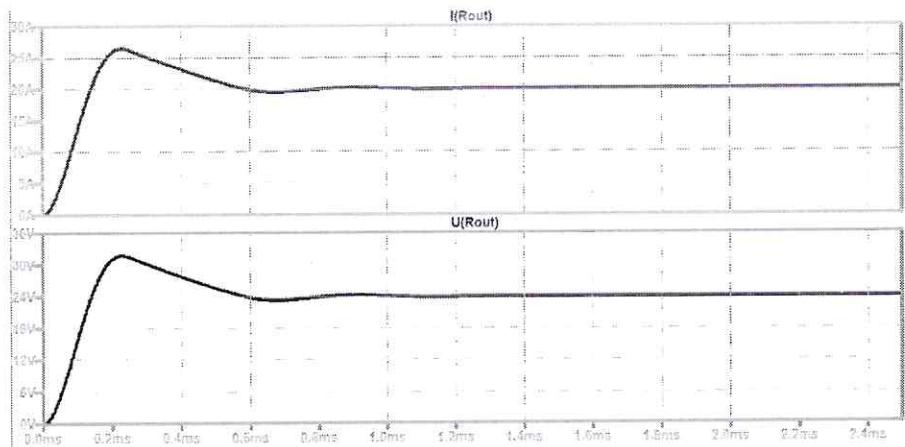
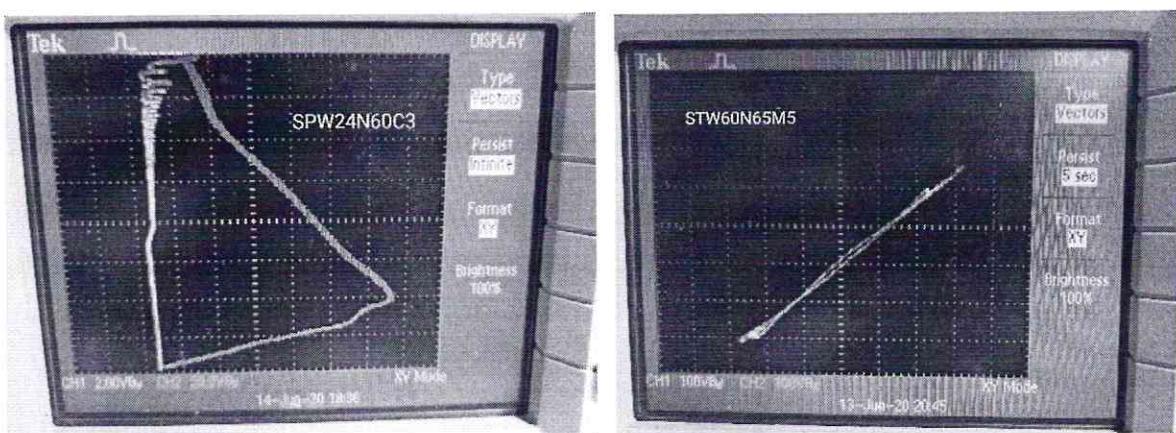


Рисунок 4. График выходного напряжения и тока LLC преобразователя

В процессе проведения исследований было выявлено, что для полевых транзисторов преобразователя характерен гистерезис выходной ёмкости – изменение величины выходной ёмкости транзистора в процессе заряда/разряда напряжением сток-исток в процессе коммутации силовых ключей. Была разработана методика и проведены натурные исследования по определению данного явления.

Выявлено, что транзисторы SPW24N60C3 и STW88N65M5 имеют большой гистерезис выходной ёмкости в процессе заряда/разряда (рис. 5а), в то время как транзистор STW60N65M5 имеет минимальный гистерезис выходной ёмкости (рис. 5б) и является идеальным решением для применения в преобразователях, работающих с переключением при нулевом напряжении. Транзисторы КП723А и SCT30N120 показали промежуточные результаты. Транзистор IGT60R070D1 демонстрирует неустойчивый режим работы.



а)

б)

Рисунок 5. Графики зависимости заряда выходной ёмкости МОП-транзисторов LLC-преобразователя от величины напряжения сток-исток

Четвёртая глава посвящена исследованиям функционирования полупроводниковых компонентов статических преобразователей при криогенном охлаждении. Для определения характеристик полупроводниковых ключей при функционировании в среде жидкого азота были проведены исследования на лабораторной установке.

Было произведено сравнение результатов экспериментальных исследований по определению характеристик кремниевых транзисторов с результатами аналитического расчёта. Выявлена высокая корреляция полученных результатов.

Анализируя полученные результаты экспериментов, можно сделать вывод, что при воздействии криосреды у транзисторов происходит изменение параметров, в частности:

1. Транзисторы IGBT:
 - увеличивается величина напряжения насыщения коллектор-эмиттер;
 - увеличивается напряжение открытия транзистора;
 - уменьшается максимальное рабочее напряжение коллектор-эмиттер;
 - увеличивается падение напряжения на обратном диоде;
 - уменьшается время обратного восстановления диода.
2. Транзисторы MOSFET:
 - уменьшается сопротивление открытого канала транзистора;
 - увеличивается напряжение открытия транзистора;
 - уменьшается максимальное рабочее напряжение сток-исток;
 - увеличивается падение напряжения на обратном диоде;
 - уменьшается время обратного восстановления диода.
3. Транзисторы SiC:
 - увеличивается сопротивление открытого канала транзистора;
 - увеличивается напряжение открытия транзистора;
 - уменьшается максимальное рабочее напряжение сток-исток;
 - увеличивается падение напряжения на обратном диоде;
 - уменьшается время обратного восстановления диода.
4. Транзисторы GaN:

- увеличивается сопротивление открытого канала транзистора;
- увеличивается напряжение открытия транзистора.

При нахождении в криосреде IGBT-транзисторы позволяют осуществлять работу на более высоких частотах. Наблюдается уменьшение динамических потерь, однако увеличение напряжения насыщения коллектор-эмиттер (рост коэффициента передачи по току) ограничивает их применение ввиду роста статических потерь.

Кремниевые MOSFET-транзисторы демонстрируют существенное снижение сопротивления открытого канала, - в 5...10 раз, уменьшение времени обратного восстановления диода, что свидетельствует о кратном уменьшении статических и динамических потерь мощности при функционировании в криосреде.

Несмотря на то, что мощность потерь в транзисторе определяется квадратичной зависимостью от величины протекающего через него тока, снижение сопротивления открытого канала, снижение динамических потерь при криогенном охлаждении позволяет использовать маломощные компоненты наравне с мощными IGBT-транзисторами в соответствующих изделиях.

При исследовании SiC- и GaN- транзисторов на предмет функционирования в условиях криосреды существенных преимуществ выявлено не было.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующем:

1. На основе аналитического обзора определено, что совершенствование технологий электродвижения наземного, воздушного и морского транспорта является приоритетным направлением развития отечественной и мировой промышленности; установлено, что применение технологий высокотемпературной сверхпроводимости и криогенного охлаждения преобразовательной техники в системах электродвижения позволяет реализовывать мощные исполнительные механизмы, работающие в диапазоне

нескольких единиц-десятков мегаватт с высокими удельными массогабаритными характеристиками.

2. Показано, что эффективность систем электроснабжения транспортных средств во многом определяется эффективностью работы преобразователей электрической энергии, в связи с чем использование топологий резонансных преобразователей в составе систем электродвижения, благодаря их высоким эксплуатационным характеристикам, наиболее предпочтительно.

3. Произведён аналитический расчёт и определение режимов работы резонансных преобразователей с последовательным резонансным LC контуром, параллельным резонансным LC контуром, последовательно-параллельным резонансным LCC контуром и последовательно-параллельным резонансным LLC контуром. Выявлены особенности функционирования, определяющие применение данных топологий в составе систем электродвижения, в частности, в составе источников вторичного электропитания.

4. Обосновано, что для использования в составе источников вторичного электропитания транспортных средств наиболее предпочтительным является резонансный преобразователь с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром.

5. Разработана методика расчёта и компьютерная модель полумостового резонансного преобразователя с последовательно-параллельным LLC резонансным контуром, выполнена проверка работоспособности данной системы и определена её эффективность. Результаты имитационного компьютерного моделирования имеют удовлетворительное совпадение с результатами выполненного аналитического расчёта и показывают, что полумостовой резонансный LLC-преобразователь обладает коэффициентом полезного действия 97 %, низкими электромагнитными помехами и соответствует эксплуатационным и техническим требованиям для применения в составе систем электродвижения.

6. Разработана методика определения изменения выходной ёмкости МОП-транзистора от величины напряжения сток-исток (гистерезиса выходной ёмкости). Произведены натурные исследования по определению данного явления

для разных групп МОП-транзисторов. Даны оценка применения выбранных транзисторов в качестве силовых ключей в составе полумостового резонансного LLC-преобразователя.

7. Исследованы характеристики силовых полупроводниковых ключей при функционировании в среде жидкого азота. Произведён аналитический расчёт и выявлена корреляция с эмпирическими данными.

8. Выявлено существенное улучшение характеристик МОП-транзисторов при охлаждении жидким азотом, что позволяет рекомендовать их к использованию в системах электродвижения при криогенных температурах наряду с мощными IGBT-транзисторами.

9. Исследование и улучшение параметров полупроводниковых ключей позволяет создавать энергоэффективные полупроводниковые преобразователи тока и напряжения, обладающие высокими удельными массогабаритными характеристиками, что способствует их внедрению в состав систем электроснабжения транспорта.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

a) в рецензируемых научных изданиях

1. Татуйко, П.С. Повышение энергоэффективности систем электрооборудования транспорта / П.С. Татуйко, Г.А. Федяева, Ю.М. Иньков, Н.Н. Сидорова // Электроника и электрооборудование транспорта, 2019. – №6. – С. 22-26.

б) в изданиях, входящих в международную базу цитирования SCOPUS

2. Tatyuk, P.S. Energy-efficient Half-bridge Voltage Converter for Vehicle Electrical Systems / P.S. Tatyuk, G.A. Fedyaeva, V.V. Kobishanov, V.P. Fedorov // 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 461-464.

в) в других изданиях и материалах конференций

3. Татуйко, П.С. Моделирование переходных процессов полумостового резонансного LLC-преобразователя в Matlab Simulink / П.С. Татуйко, А.И. Власов

// САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. I Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина – Брянск: БГТУ, 2017 – С. 37-40.

4. Татуйко, П.С. Перспективы применения резонансных LLC-преобразователей при проектировании импульсных источников постоянного напряжения /П.С. Татуйко, А.И. Власов // Сборник докладов X и XI Научно-технических конференций молодых специалистов по радиоэлектронике, 2018 – С. 12-16.

5. Татуйко, П.С. Реализация однофазного корректора коэффициента мощности на однотактном ШИМ-контроллере с использованием отечественной элементной базы / П.С. Татуйко, А.И. Власов // Сборник докладов X и XI Научно-технических конференций молодых специалистов по радиоэлектронике, 2018 – С. 98-101.

6. Татуйко, П.С. Применение энергоэффективных преобразователей напряжения в системах электрооборудования транспорта / П.С. Татуйко, Г.А. Федяева // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. II Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина – Брянск: БГТУ, 2018. - Ч.1. – С. 233-234.

7. Татуйко, П.С. Повышение энергоэффективности электропривода механизма передвижения мостовых кранов / П.С. Татуйко, Г.А. Федяева, А.И. Беззубенко, А.Г. Надточей // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина – Брянск: БГТУ, 2018. – С. 113-115.

8. Татуйко, П.С. Повышение энергоэффективности электрических транспортных средств / П.С. Татуйко, Г.А. Федяева, А.И. Беззубенко // САПР и моделирование в современной электронике: сб. науч. тр. III Международной научно-практической конференции / под ред. Л.А. Потапова, А.Ю. Дракина – Брянск: БГТУ, 2018. – С. 303-306.

Татуйко Павел Станиславович

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Подписано в печать ___._____.2022 Заказ №_____ Формат 60Х90/16
Усл. печ. л. – 1,2 Тираж 80 экз.

ОДВиП ЦСО РУТ (МИИТ), Москва, 127994, ул. Образцова, дом 9, стр,9.