

На правах рукописи



Жегов Николай Алексеевич

**Исследование и разработка обратимых вторичных источников
электропитания с трансформаторным звеном высокой частоты для
космических электроэнергетических комплексов**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2017

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая электротехника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель:	Станислав Борисович Резников – д.т.н., профессор кафедры «Теоретическая электротехника» МАИ
Официальные оппоненты	Владимир Степанович Саенко – доктор технических наук, профессор, лауреат премии Правительства РФ, Московский институт электроники и математики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Ведущая организация	Сергей Федорович Коняхин – кандидат технических наук, Главный конструктор систем преобразования электроэнергии – заместитель главного конструктора АО «Аэроэлектромаш». Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»

Защита диссертации состоится 21 декабря 2017 г. в 13 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, корп. «Г», ауд. 302 (кафедра 310).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского авиационного института (национального исследовательского университета), www.mai.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.07



В.С. Степанов

Актуальность работы.

В настоящее время наблюдается бурное развитие электрификации транспортных средств, мобильных средств связи, космических спутников и летательных аппаратов с использованием низковольтных химических генераторов, солнечных батарей, аккумуляторных и суперконденсаторных (ионисторных) батарей. Основным недостатком указанных первичных источников электропитания является их относительно низкое напряжение, а следовательно — большой потребляемый ток, существенно снижающий КПД и удельную мощность вторичных источников электропитания (ВИЭП), в частности — так называемых, резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания (Р/А ИБП). Отличительной особенностью электроэнергетических комплексов (ЭЭК) космических летательных аппаратов (КА) является отсутствие электромашинных генераторов. При этом для большого числа бортовых потребителей электроэнергии КА наиболее предпочтительными видами питающих напряжений являются повышенные напряжения: а) повышенное переменное трехфазное напряжение стабильной частоты и б) повышенное постоянное напряжение. В работах кафедры «Теоретическая электротехника» МАИ предложены в качестве рациональных для систем распределения электроэнергии ЛА дифференциальные постоянные повышенные напряжения (например, ДППН $0 \pm 135\text{В}$ или $0 \pm 270\text{В}$). Этот вид напряжения позволяет просто и надежно осуществлять параллельное включение нескольких каналов ЭЭК для повышения динамической устойчивости и повышения качества электроэнергии, а также удобен для непосредственного питания регулируемых инверторов синусоидальных напряжений и токов (РИСН/Т), в частности — полумостовых трехфазных. При этом необходимо обеспечить взаимно-резервную (обратимую) связь питающих каналов с указанными видами напряжения. Из вышесказанного следует целесообразность использования в ЭЭК КА ВИЭП с возможностью обратимых (двунаправленных) преобразований: а) постоянного низкого напряжения (ПНН) и дифференциальных повышенных (ДППН), например, $\pm 27\text{В}$ и $0 \pm 135\text{В}$ ($0 \pm 270\text{В}$); б) ДППН и постоянного низкого напряжения (ПНН) в трехфазное переменное (со стабильными или регулируемыми параметрами: обратимость преобразования с помощью одних и тех же активных узлов и элементов ВИЭП позволяет существенно снизить их суммарную массу и габариты. Совершенствованию импульсных преобразователей, расширению функциональности, улучшению массоэнергетической эффективности ВИЭП посвящены работы российских и зарубежных организаций и компаний:

Московский энергетический институт, ООО «Силовая электроника», Компания Crane Aerospace & Electronics (Крэйн Аэроспэйс и Электроникс), Инновационная группа компаний «Вторичные источники питания Александра Гончарова», АО «Группа Компаний «Электронинвест». Указанным преобразователям посвящены научные труды следующих отечественных и зарубежных ученых: Е.В. Машуков, В.И. Мелешин, Д.А. Шевцов, С.Б. Резников, В.В. Бочаров, С.И. Вольский, С.А. Эраносян, С.В. Аверин, А.В. Лукин, И.А. Харченко, Suk S., А.В. Кривилев, С.А. Ненахов и др.

Однако в работах перечисленных авторов недостаточно внимания уделено следующим проблемам: а) способу совмещения двух импульсных преобразований: трансформаторного и трансреакторного, позволяющему улучшить массоэнергетические характеристики устройств (удельную мощность и КПД); б) использованию токозамыкающих пауз при ШИМ-регулировании, позволяющих применить дуальное управление для повышения статической устойчивости, обеспечить антинасыщающее ограничение величины потокосцепления реакторов и повысить КПД трансреактора; в) обратимости и многофункциональности импульсных преобразователей, г) модульно-масштабируемой архитектуре преобразователей и др. В связи с вышесказанным предлагаемая диссертационная работа представляется актуальной.

Объект исследования: две конкурентно-способные альтернативные силовые схемы импульсных обратимых ВИЭП (ОВИЭП) средней мощности: а) с одноктактными трансреакторными модуляторами и б) с комбинированными двухтактными трансреакторно-трансформаторными модуляторами и циклоконверторными делителями частоты.

Предмет исследования: сравнительный анализ (на базе имитационно-компьютерного моделирования) массоэнергетических характеристик (удельной мощности и КПД); оптимизация параметров элементов и алгоритмов управления; определение рациональных областей применения альтернативных вариантов ОВИЭП. **Цель исследования:** разработка схемотехнических решений для обратимых вторичных источников электропитания (ОВИЭП) на базе двунаправленных конверторов с гальванической развязкой и трехфазного инвертора с трансформаторным звеном прямоугольного тока высокой частоты ($TЗПТ_{вч}$), обеспечивающих высокие массоэнергетические, надежность характеристики применительно к космическим электроэнергетическим комплексам (КЭЭК), а также рекомендаций к проектированию.

Задачи, решаемые для достижения цели: •Анализ известных типов ВИЭП и их функциональных возможностей (обратимость, многофункциональность, дуальное управление, взаиморезервирование, параллельно-модульное расщепление и др.). •Разработка схемотехнических решений для многофункциональных высокоэффективных ОВИЭП с учетом электроэнергетической совместимости. •Компьютерно-имитационное моделирование схем ОВИЭП с одноктактным и двухтактным импульсными модуляторами. Расчет массоэнергетических, надежностных характеристик. Разработка рекомендаций к проектированию и определение областей рационального применения.

Научная новизна. 1. Предложен способ совмещения двух импульсных преобразований: трансформаторного и трансреакторного, позволяющий улучшить массоэнергетические характеристики (удельную мощность и КПД). 2. Предложено использование токозамыкающих пауз при ШИМ-регулировании тока, позволяющих повысить КПД трансреакторов и применить дуальное управление для повышения статической устойчивости и обеспечить антинасыщающее ограничение потокосцепления реакторов.

3. Предложен способ сочленения блоков имитационных, а также расчетно-вычислительных компьютерных моделей импульсных модуляторов-демодуляторов с трансреакторной гальванической развязкой путем введения емкостно-резистивных «квазизвеньев» для согласования (интегрирования) внешних токов. Способ позволяет отдельно исследовать процессы в каждом блоке и оптимизировать параметры его элементов и узлов.

Практическая значимость: Предложена модернизация реверсивного обратимого непосредственного импульсного конвертора (РОНИК) расширяющая его функциональные возможности за счет двунаправленного режима полярно-инвертирующего понижения/повышения напряжения (режима «дозирования») и позволяющая использовать его схему в качестве унифицированного модуля для широкого класса многофункциональных импульсных преобразователей (МИП) с модульно-масштабируемой архитектурой (но без гальванической развязки). Предложены (в соавторстве) и исследованы нетрадиционные схемотехнические решения для комбинированных обратимых трансформаторно-трансреакторных импульсных конверторов (КОТ/ТИК) с сочетанием гальвано-развязывающих и согласующих узлов: а) трансформатора тока и б) прямо/обратноходового трансреактора, с расширенными функциональными возможностями и повышенной массоэнергетической эффективностью. Разработаны имитационно-компьютерные модели ОВИЭП в среде «EasyEда» и проведен

сравнительный анализ массоэнергетических характеристик и показателей ЭМС двух альтернативных вариантов схемотехнических решений для КОТ/ТИК: однотактного и двухтактного. Проведена оценка функциональной надежности вариантов и выявлены области их рационального применения. Проведено экспериментальное подтверждение достоверности теоретических положений, определены погрешности имитационно-компьютерных моделей ОВИЭП.

Положения выносимые на защиту

- схемотехнические решения для многофункциональных, в частности обратимых импульсных преобразователей с учетом электроэнергетической совместимости;
- способ совмещения двух преобразований: трансформаторного и трансреакторного, позволяющий улучшить массоэнергетические характеристики преобразователей;
- использование токозамыкающих пауз при ШИМ-регулировании, позволяющее повысить КПД трансреакторов и применить дуальное управление для повышения статической устойчивости и ограничивающее потокосцепление реакторов для исключения насыщения;
- способ сочленения имитационных, а также расчетно-вычислительных компьютерных моделей импульсных модуляторов-демодуляторов с трансреакторной гальванической развязкой путем введения емкостно-резистивных «квазизвеньев» для согласования (интегрирования) внешних токов, позволяющий отдельно исследовать процессы в каждом блоке и оптимизировать параметры его элементов и узлов;
- имитационно-компьютерные модели в среде «EasyEda» и результаты сравнительного анализа массоэнергетических характеристик двух альтернативных вариантов схемотехнических решений для ОВИЭП (однотактных и двухтактных КОТ/ТИК).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы теории автоматического управления, методы теории электрических цепей, методы дифференциального и интегрального исчислений и имитационного компьютерного моделирования.

Степень достоверности результатов определяется правильным использованием положений теории электрических цепей, теории автоматического управления, применяемым имитационно-компьютерным аппаратом и сопоставлением результатов проведенных исследований с результатами экспериментов.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы использованы в НИР МАИ–ФГУП «ГосНИИАС» 2017 г. №53390-03090, выполненной на кафедре «Теоретическая электротехника» МАИ, в учебном процессе кафедры – в материалах лекций, лабораторных работ и дипломно-курсовых проектов по курсу «Электромагнитная совместимость комплексов ЛА» для специалистов и бакалавров факультета №3 «МАИ(НИУ)», а также при подготовке к публикации монографии «Способы и средства повышения качества электроэнергии систем электроснабжения полностью электрифицированных самолетов», под ред. И.А. Харченко, изд-во МАИ, 2017

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на.

- II ежегодной всероссийской научно-технической конференции «Технологии, измерения и испытания в области электромагнитной совместимости» — «ТехноЭМС 2015»

- Международной молодёжной научной конференции 2015 г. «XLI Гагаринские чтения»

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 13 научных работ, среди которых: 8 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень рекомендуемых изданий ВАК РФ, 3 патента РФ на полезную модель, 2 доклада на научно-технических всероссийских конференциях.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, а также сформулированы ее цели и задачи. Определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации, публикациях и структуре диссертационной работы.

В первой главе проведены обзор и анализ существующих вторичных источников электропитания (ВИЭП), в частности – обратимых (ОВИЭП) сформулированы требования, предъявляемые к ним. Выявлены вопросы, которым уделено недостаточное внимание, в частности: • совмещению двух преобразований: трансформаторного и трансреакторного, позволяющему повысить массоэнергетические характеристики ВИЭП (удельную мощность и КПД); • использованию токозамыкающих пауз при ШИМ-регулировании, позволяющих повысить КПД и применить дуальное управление для ограничения насыщающего потокосцепления реактора; • обеспечению многофункциональности, в частности — обратимости (двунаправленности)

преобразования электроэнергии и гальванической развязке импульсных модуляторов/демодуляторов.

В качестве отдаленных аналогов для исследуемых ОВИЭП с ТЗВЧ исследованы известные унифицированные базовые модули обратимых непосредственных импульсных конверторов (ОИК) с промежуточным индуктивным накопителем, частично пригодные для реализации модульно-масштабируемой архитектуры преобразователей (с параллельным расщеплением), но без гальванической развязки. Проанализированы известные рациональные силовые схемы для унифицированного модуля обратимого непосредственного импульсного конвертора (ОНИК). На рис. 1 приведены четыре варианта силовой схемы ОНИК с заземленными внешними выводами («трехполюсники»): а) с однообмоточным двунаправленным реактором L без накопления энергии; б, в, г) с двухобмоточными однонаправленными (по потокосцеплению) накопительными реакторами $T-L_{1,2H}$; из них б) с однополярным выходом, в, г) реверсивные — с двухполярным выходом (РОНИК), причем в) — с двумя разнополярными входами, г) с двухполярными входом и выходом. Сравнительный анализ схем выявил следующее. Первый вариант схемы ОНИК (рис. 1, а) в зависимости от направления преобразования может работать в режимах «повышения», «понижения» и «понижающе-повышающем», причем — либо в «полярно-повторяющем», либо в «полярно-инвертирующем». Однако, несмотря на указанную универсальность (многофункциональность), этот вариант в аспекте ранее перечисленных рекомендаций, помимо отсутствия гальванической развязки, присущего бестрансформаторным схемам, обладает также следующими существенными недостатками: отсутствие регулярных пауз с сохранением потокосцепления индуктивного накопителя; низкое быстродействие переключения режимов прямого и обратного преобразования (из-за реверса тока в L); наличие цепи для возможных «сквозных сверхтоков» через двухтранзисторную стойку $V_{T1,2}$ при несанкционированном одновременном включении ключей; отсутствие реверсивного выхода. Второй вариант схемы ОНИК (рис. 1, б) свободен от первых трех указанных недостатков и по сравнению с первым вариантом обладает несомненными преимуществами. Третий и четвертый варианты схемы ОНИК (РОНИК, рис. 1, в, г) свободны от всех четырех недостатков по сравнению с первым и обладают важным преимуществом по сравнению со вторым, а именно: имеют двухполярный (реверсивный) выход, т.е. охватывают функцию инвертора тока/напряжения. В данной работе предложена модернизация последней из известных схем (рис. 1), а именно

введение тиристоров $VS_{1,2}$, позволяющее расширить функциональные возможности схемы, за счет использования двунаправленного полярно-инвертирующего «дозаторного» режима понижения/повышения. При такой модернизации указанный вариант РОНИК, дополненный нерассеивающими демпферно-снабберными цепями (ДСЦ), может быть рекомендован в качестве унифицированного базового модуля многофункционального импульсного преобразователя (МИП) для преобразовательных комплексов с модульно-масштабируемой архитектурой, но без гальванической развязки.

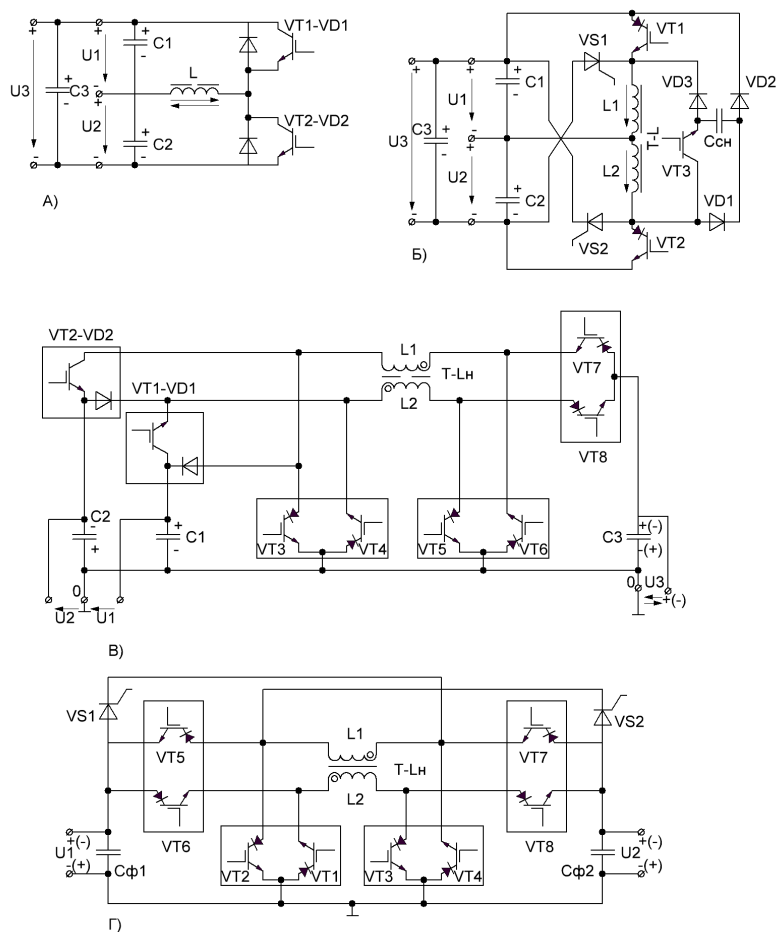


Рис 1 Варианты силовых схем ОНИК с заземленными внешними выводами («трехполюсники»)

Выбраны и проанализированы известные рациональные силовые схемы для унифицированного модуля обратимого трансформаторного (трансреакторного) импульсного конвертора (ОТИК) с индуктивным накопителем. На рис. 2 приведены известные варианты схем ОТИК с индуктивными накопителями: а) с инверторно-трансформаторным звеном высокой частоты (ИН→В/В←ИТ) и накопительным реактором (L_H); б, в,) с двумя встречными импульсными модуляторами $ИМ_{1,2}$ и накопительным трансреактором $T-L_H$ на базе промежуточного емкостного фильтра $C_{пр.ф}$ —

с квадратичной регулировочной характеристикой. Сравнительный анализ приведенных схем выявил следующее. Первый вариант схемы ОТИК (рис. 2, а) по структуре близок к классическим конверторам с промежуточным согласующим и гальваноразвязывающим трансформаторным звеном высокой частоты. Он обладает рядом достоинств. Одним из недостатков этой схемы является относительно большое количество модулирующих транзисторных ключей (7 шт.). К более существенным недостаткам первого варианта (рис. 2, а) относится наличие, помимо реактора, дополнительного моточного изделия — трансформатора с замкнутым магнитопроводом, плохо сочетаемым с печатным монтажом и каркасными катушками. Другие варианты свободны от этого недостатка.

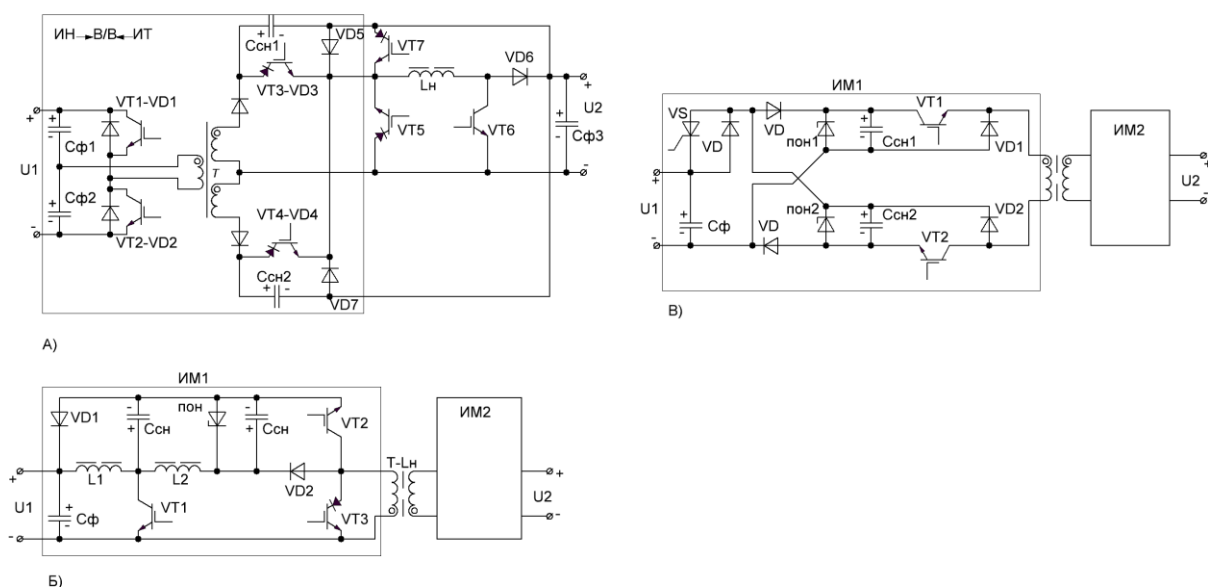


Рис. 2 Варианты схем ОТИК с индуктивными (реакторными или трансреакторными) накопителями

Проведен сравнительный анализ известных схем трансформаторных конверторов: а) на базе одноконтурной «трансформаторной схемы Кука» (патент U.S. Jan.15.1980, 4.184,197) и б) на базе двухконтурного модулятора с трансформаторным звеном прямоугольного тока высокой частоты (ТЗПТ_{В/ч}). Анализ выявил практическую неработоспособность данной схемы из-за отсутствия цепей рекуперации энергии индуктивностей рассеяния трансформатора. Предложены пути для обеспечения работоспособности «трансформаторной схемы Кука» и её дальнейшей модернизации с целью обеспечения двунаправленности преобразования энергии (обратимости). К ним относятся: 1) обеспечение цепей для нерассеивающей рекуперации энергии индуктивностей рассеяния трансформатора. 2) симметричная топология однотипных блоков импульсной модуляции—демодуляции для

обеспечения обратимости. 3) совмещение способов трансформаторного и трансреакторного (прямо- и обратногоходового) преобразований для повышения удельной мощности и КПД модуляторов—демодуляторов.

Исследованы известные схемы унифицированных модулей обратимых импульсных конвертеров для синтеза многофункциональных импульсных преобразователей (МИП), охватывающих и функции преобразователей частоты. На рис. 3 представлена принципиально-структурная силовая схема преобразователя частоты с входным Виенна-выпрямителем—корректором коэффициента мощности (В-В-ККМ), промежуточным дифференциальным звеном постоянных напряжений (с импульсным делителем напряжения — ИДН) и выходным двунаправленным инверторно-выпрямительным преобразователем с регулируемым инвертором синусоидального тока/напряжения (ДИВП-РИСТ/Н).

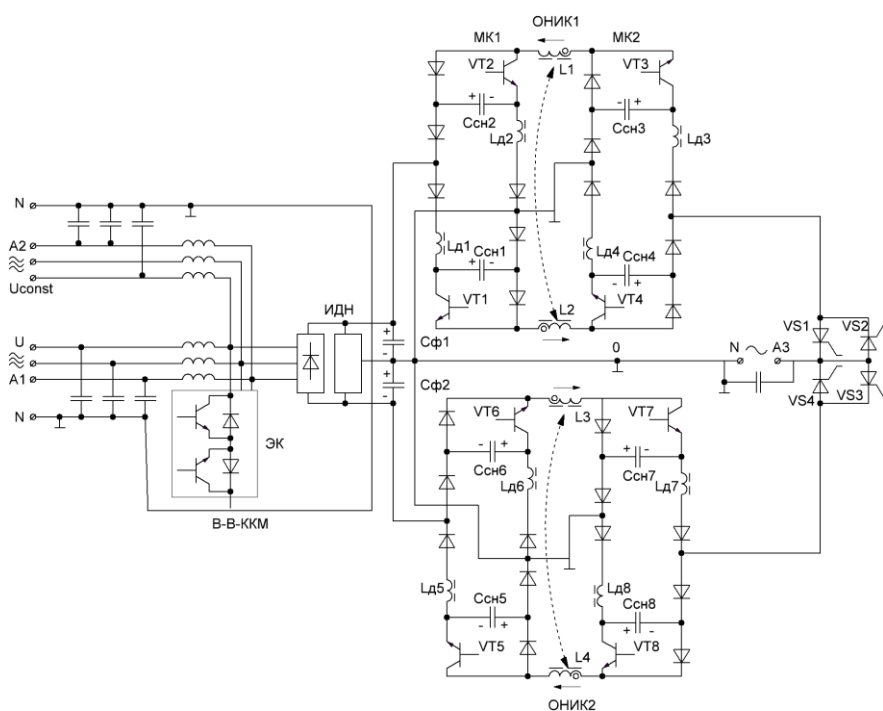


Рис. 3 Схема преобразования частоты с входным Виенна-выпрямителем (В-В-ККМ), дифференциальным импульсным делителем напряжения (ИДН) и ДИВП-РИСТ/Н на базе двух унифицированных модулей, полярно-повторяющих ОНИК

К ее достоинствам относятся: 1) выпрямление с коррекцией коэффициента мощности (ККМ); 2) одновременная стабилизация дифференциальных выпрямленных напряжений и амплитуды питающего переменного трехфазного напряжения; наличия общего заземления нейтрали питающего напряжения и среднепотенциального вывода дифференциального

звена постоянного напряжения; 3) симметрирование выпрямленных напряжений; 4) обеспечение трехфазного выхода с использованием однотипных модулей ОНИК. К недостаткам схемы относятся: а) отсутствие обратимости преобразования; б) отсутствие гальванической развязки между входом и выходом; в) повышенные масса и габариты выходного емкостного фильтра при работе на нагрузку с низким коэффициентом мощности.

По результатам обзора и анализа существующих схемотехнических решений для ВИЭП можно сделать следующие выводы: • В большинстве известных решений проблемы обратимости и многофункциональности преобразования решаются «лобовыми» способами: за счет отдельных блоков прямого и обратного преобразования и как следствия – приблизительного удвоения массы и габаритов устройства. • Из известных решений наиболее рациональными представляются решения на базе трансформаторных и/или трансреакторных промежуточных звеньев высокой частоты (ТЗВЧ), обеспечивающих гальваническую развязку при относительно большой удельной мощности ВИЭП. • Создание ОВИЭП, пригодных для А/К ЭЭК с высокотехнологичной модульно-масштабируемой архитектурой требует существенной модернизации известных и разработки принципиально новых схемотехнических решений.

Во второй главе разработаны нетрадиционные схемотехнические решения для обратимых вторичных источников электропитания (ОВИЭП). Предложено (в соавторстве) схемотехническое решение для высокоэффективного резервно-аккумуляторного источника бесперебойного питания (ИБП) в составе авиакосмических транспортных ЭЭК (Рис. 5). Схема содержит: дифференциальное звено постоянных повышенных напряжений (ДЗППН: Сф₂-Сф₃), звено высокой частоты на базе многообмоточного трансформатора прямоугольного тока (ЗВЧ-ТПТ), два косомостовых импульсных модулятора (ИМ_{1,2}), Виенна-выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности (В-В-ККМ), два импульсных уравнивающих делителя напряжений (УДН_{1,2}), три однофазных циклоконвертора (ЦК_{А,В,С}) и два распределительных устройства – постоянного низкого напряжения (РУ±27В) с подключаемой аккумуляторной батареей (АБ) и переменного трехфазного напряжения стабильной частоты (115/200 В, 400 Гц). Следует отметить, что внешние выводы ДЗППН с разнополярными потенциалами (±Vd) используются для параллельного включения аналогичных каналов ЭЭК (для повышения общей установочной мощности и качества электроэнергии в переходных режимах, а также обеспечения «горячего» резерва и питания наиболее мощных трехфазных инверторов и регуляторов

напряжения (например, полумостовых трехфазных трехуровневых инверторов, питающих при запуске силовых установок магистральные стартер-генераторы (Ст-Г), а также мощные исполнительные механизмы. Что касается подсистемы распределения постоянного повышенного напряжения (РУ_{ПН}), то она в настоящее время на авиакосмических ЛА не используются из-за сложности реализации бездуговой аварийной и штатной коммутации. Можно также отметить, что ЗВЧ-ТПТ может быть снабжено дополнительными группами фазных обмоток и регулируемых циклоконверторов (РЦК) для индивидуального питания регулируемых исполнительных электродвигателей (ИЭД) малой и средней мощности. Рекуперация энергии торможения ИЭД производится в широком скоростном диапазоне (вплоть до торможения) с помощью дополнительного выпрямителя (В) и повышающего (бустерного) одноконтурного импульсного модулятора (ИМ₃).

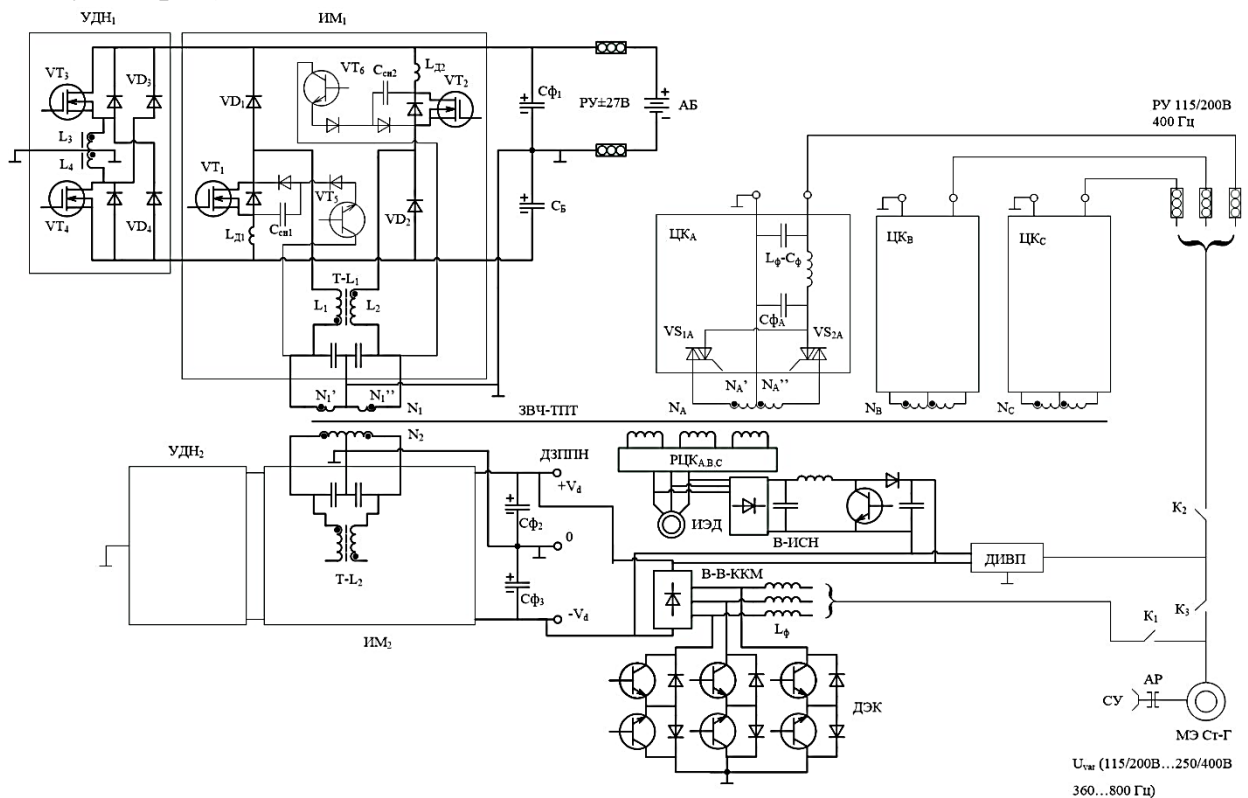


Рис. 5 Многофункциональный вторичный источник электропитания

На рис.6 приведена упрощенная силовая схема предлагаемого трансформаторного многофункционального импульсного преобразователя (ТМИП) для ИБП авиакосмического назначения. Схема содержит: два однотипных обратимых конверторно-инверторных модулятора (ОКИМ_{1,2}) и двухсимисторный циклоконвертор (VS₃₋₄—VS₅₋₆), разделенные трехобмоточным трансформатором (Т) и зашунтированные со стороны внешних выводов (U₁, U₂, U₃, U₄) фильтровыми конденсаторами (C₁, C₂, C₃,

С₄). Каждый из ОКИМ составлен из последовательно между собой соединенных транзисторного ключа (VT), балластного дросселя (L) и диодно-тиристорной стойки (VD—VS). Дроссели L₁ и L₂ могут иметь общий магнитопровод (показан пунктиром), для снижения пульсации внешних токов за счет взаимоиндуктивной связи (M). Основной топологический скелет ОКИМ имеет прототипом топологию однонаправленной, упомянутой выше, трансформаторной схемы Кука. Помимо обеспечения двунаправленности и расширения функциональных возможностей за счет функции низкочастотного регулируемого инвертора на базе циклоконвертора с высокочастотным питанием в приведенной схеме исправлена существенная ошибка, допущенная С. Куком и С. Ненаховым и перечеркивающая работоспособность схемы: неучет индуктивностей рассеяния обмоток трансформатора, ЭДС самоиндукции которых не позволяют выключать силовой транзистор (VT) без недопустимых перенапряжений на нем. Утилизация энергии индуктивностей рассеяния трансформатора и индуктивностей демпферных дросселей (L_{д1,2}) обеспечивается введением силовых диодно-тиристорных стоек (VD_{1,2}—VS_{1,2}) и разрядных тиристоров (VS_{11,12}), подключенных через снабберные конденсаторы (C_{сн1,2}) к силовым выводам ключей.

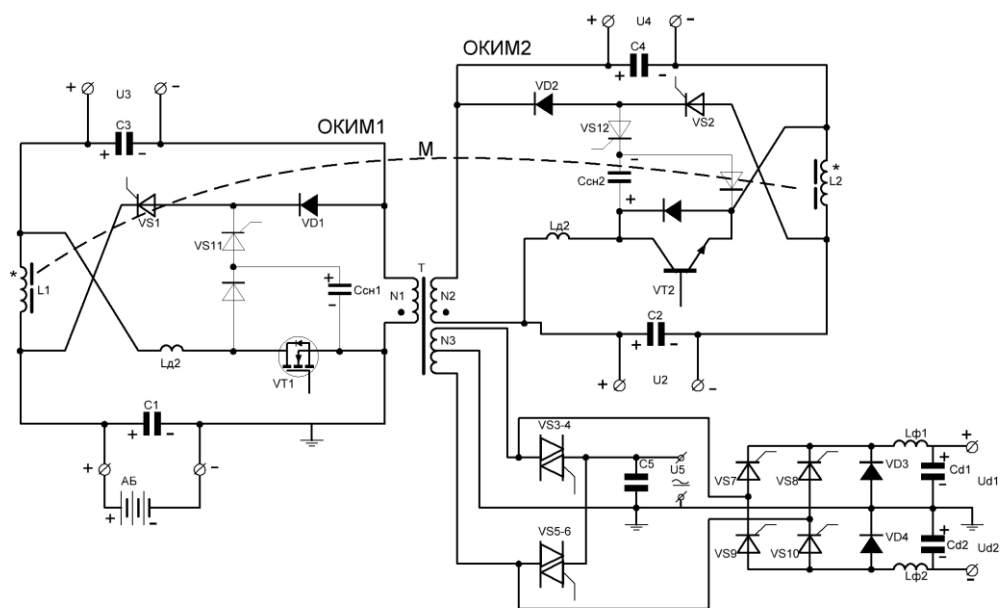


Рис. 6 Упрощенная силовая схема трансформаторного импульсного преобразователя (ТМИП) для источника бесперебойного питания (ИБП) Предложено также (в соавторстве) нетрадиционное схемотехническое решение для двухтактного трансформаторного импульсного преобразователя, используемого в космическом электроэнергетическом комплексе (рис 7). Она содержит: низковольтный и высоковольтный

импульсно-модуляторные коммутаторы (ИМК₁ и ИМК₂); трансформатор прямоугольного тока (ТПТ) с первичной (N₁), вторичной (N₂) и тремя фазными обмотками (N_{3A}, N_{3B}, N_{3C}); балластный двухобмоточный трансреактор (L_{Б1-2}); шины дифференциального звена постоянных повышенных напряжений (ДЗППН); трехфазный симисторный циклоконвертер (ЦК); однопольные по схемам стабилизатор напряжений (УДН), импульсный регулятор тока рекуперативного торможения (ИРТрт); аккумуляторную батарею (АБ) с размыкающим контактором (К_{АБ}); стабилизатор напряжения U_{сб} (C_тU_{сб}). В состав ЭЭК входят: исполнительный электродвигатель с рекуперативным торможением (ИЭД-РТ); распределительное устройство со стабильными частотой и амплитудой трехфазных напряжений (РУ f-const, U-const); контакторы (К_{ру} и К_{иэд}); трехфазный индуктивно емкостной фильтр низкой частоты (L_ф-C_ф).

На Рис. 7 приведена силовая схема двухтактного трансформаторного импульсного преобразователя. Предложенное решение позволяет обеспечить повышение удельной мощности и технологичности, а также расширение функций бортовых зарядно-аккумуляторных устройств.

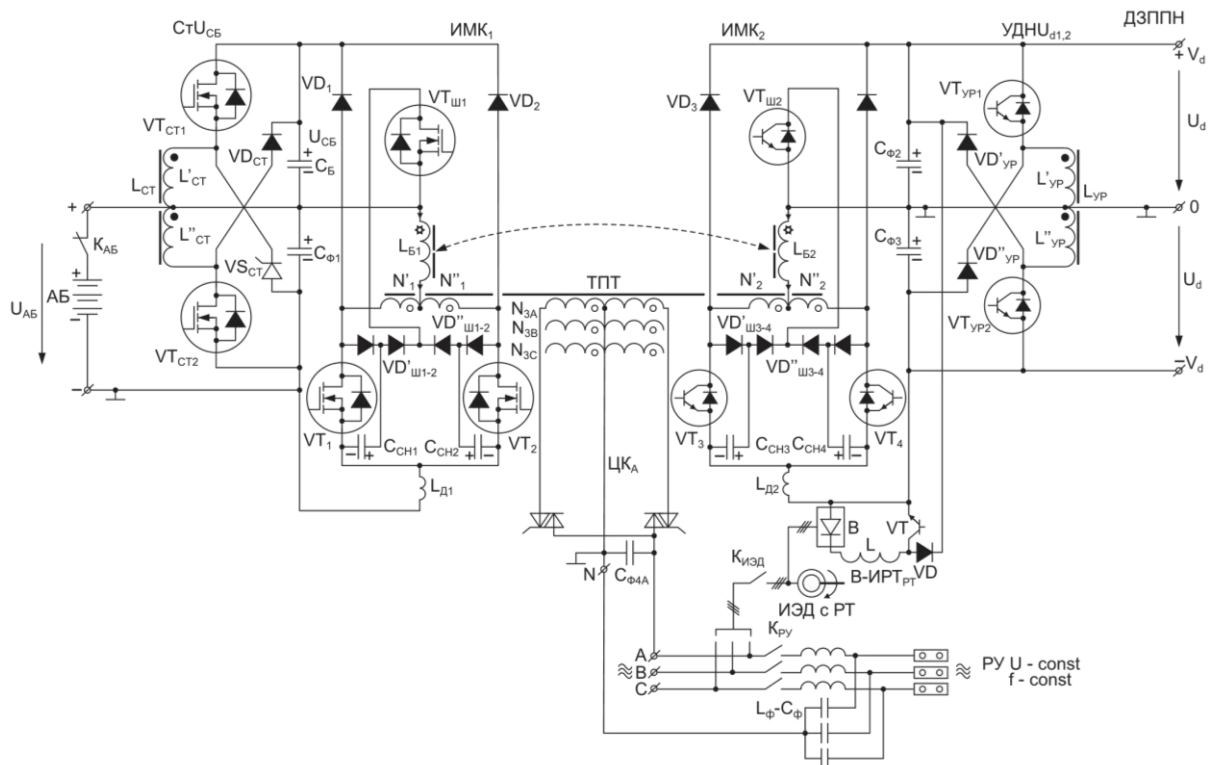


Рис. 7 Схема двухтактного трансформаторного импульсного преобразователя

На рис.8 приведена принципиальная силовая схема унифицированного однофазного модуля трансреакторного МИП с демодуляторным трансреактором (Т-Л) и следующими функциями: а) понижающе-повышающего трехуровневого ШИМ-инвертора синусоидального

тока/напряжения (ИСТ/Н); б) выпрямителя с коррекцией коэффициента мощности, с дифференциальным выходом и с уравнивающим делителем напряжения (В-ККМ-УДН) и в) стабилизатора выпрямленных и переменного напряжений (СН \sim). Модуль содержит: пять двухтранзисторных стоек ($VT_{1,2}$ - $VT_{9,10}$), снабженных обратно-блокирующими диодами (типа RB-IGBT), две пары диодно-тиристорных стоек ($VD_{1,2}$ - $VS_{1,2}$ и $VD_{3,4}$ - $VS_{3,4}$), двухконденсаторную фильтровую стойку ($C_{\phi 1}$ - $C_{\phi 2}$) дифференциального звена постоянных повышенных напряжений (ДЗППН $0 \pm U_{d1,2}$) и две пары фазных выводов переменных напряжений: с нестабильными параметрами частоты и амплитуды (U_0 -var) и со стабильной амплитудой (U_0 -const). Примерами параметров указанных напряжений могут являться нормируемые в ГОСТ на качество электроэнергии самолетов величины: $U_d=270$ или 540 В, $U_0/\sqrt{2}=115$ В (при частоте от 360 до 800 Гц). Возможен также вариант с дифференциальными напряжениями: 0 ± 135 В (т.е. $U_d=135$ В). Рассмотрена работа схемы модуля отдельно для каждого из режимов: 1) выпрямления с коррекцией коэффициента мощности и стабилизацией напряжений; 2) инвертирования синусоидального тока/напряжения и 3) уравнивающего деления постоянных напряжений.

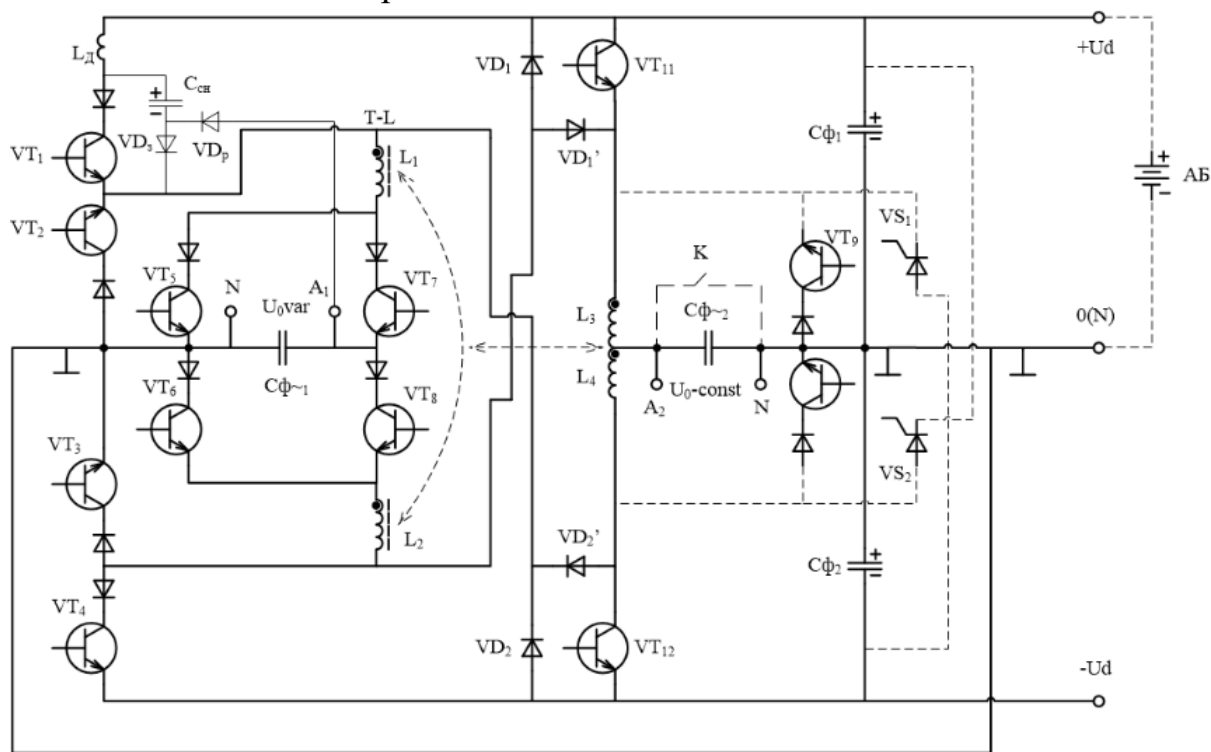


Рис. 8 Силовая схема унифицированного однофазного модуля трансреакторного МИП с демодуляторным трансреактором (Т-Л)

Предложены также схемотехнические решения (в соавторстве) для обратимых трансформаторных импульсных конверторов в составе резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания. Рассмотрены два

взаимно-альтернативных варианта структур ОТИК в качестве ВИЭП для Р/А ИБП (рис.9): а) ОТИК на базе двух ДИВП с балластными реакторами постоянного тока и промежуточного ТЗВЧ с трансформатором прямоугольного тока (ТПТ), б) ОТИК на базе двух одноконтных двунаправленных импульсных модуляторов/выпрямителей (ДИМ/В) и промежуточного трансреактора (Т—L). Оба варианта обеспечивают согласование входного и выходного преобразователей по напряжению и их гальваническую развязку, а также исключают насыщение магнитопровода трансформатора прямоугольного тока (ТПТ) и трансреактора без введения специальных симметрирующих устройств.

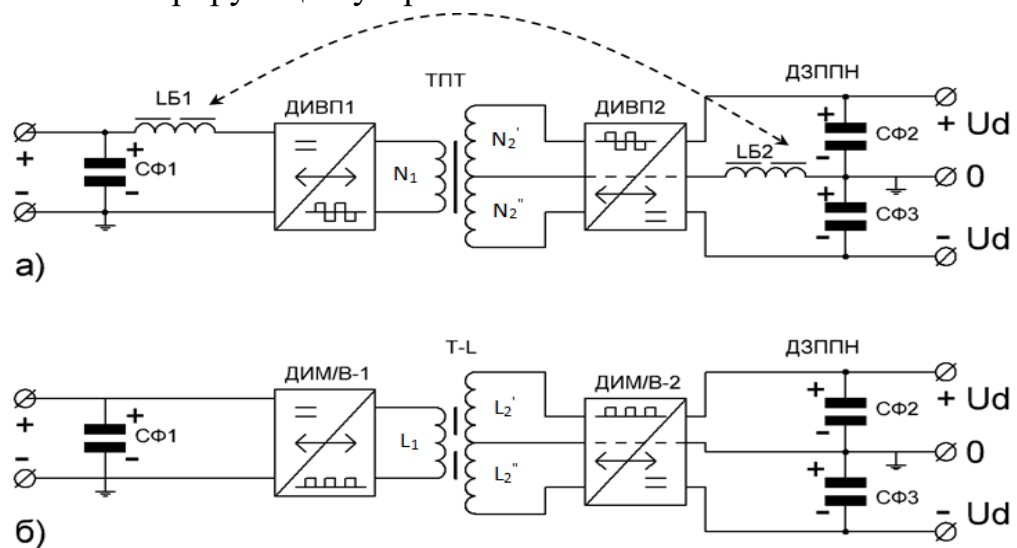


Рис. 9 Обратимые трансформаторные импульсные конвертеры для ИБП

В третий главе проведено имитационно-компьютерное моделирование ОВИЭП и разработаны рекомендации к их проектированию. Промоделированы схемы ОВИЭП двух вариантов: одноконтного и двухконтного.

На рис.10 приведена упрощенная силовая схема смоделированного одноконтного трансформаторного многофункционального импульсного преобразователя (ТМИП) для ИБП авиакосмического назначения. Схема содержит: два однотипных обратимых конверторно-инверторных модулятора (ОКИМ_{1,2}) и двухсимисторный циклоконвертор (VS₃₋₄—VS₅₋₆), разделенные трехобмоточным трансформатором (Т). Каждый из ОКИМ составлен из последовательно между собой соединенных транзисторного ключа (VT_{1,2}) балластного трансреактора с двумя дросселями (L_{1,2}) и диодами (VD_{1,2}). Дроссели L₁ и L₂ имеют общий магнитопровод (показан пунктиром) для повышения передаваемой мощности и КПД или для снижения пульсации

внешних токов за счет взаимоиндуктивной связи (M), в зависимости от полярностей включения обмоток (на схеме использована первая полярность).

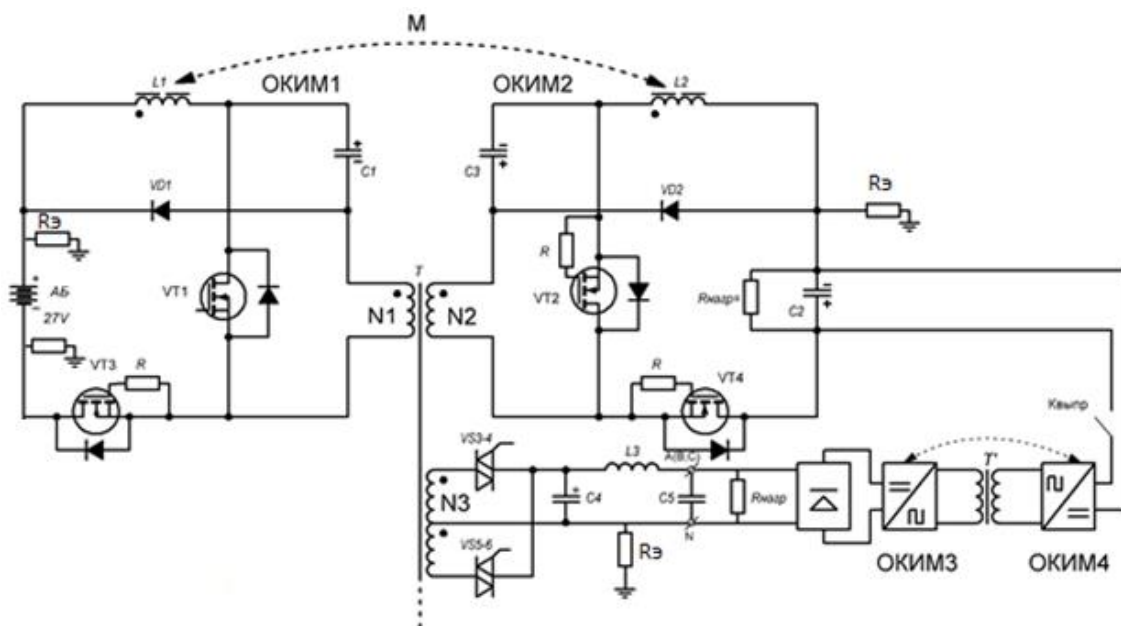


Рис. 10 Схема однофазного трансформаторного многофункционального импульсного преобразователя (ТМИП)

К существенным достоинствам предложенной схемы можно отнести следующие:

- обратимость (двунаправленность) преобразования, т.е. возможность питания униполярного звена постоянного повышенного напряжения (ЗППН) или зарядки аккумуляторной батареи;

- обеспечение питанием не только дифференциального звена постоянного повышенного напряжения (ДЗППН), но и нагрузок регулируемого низкочастотного переменного напряжения, в том числе трехфазного (например, синхронных или асинхронных исполнительных электродвигателей, в частности – бортового стартер-генератора);

На рис. 11 и 12 показаны типовые осциллограммы тока при работе однофазной схемы. Обратное преобразование электроэнергии из цепей нагрузок переменного тока (преобразование реактивных мощностей или рекуперация энергии при рекуперативном торможении исполнительного электропривода) осуществляется через дополнительный мостовой выпрямитель (МВ) при замкнутом контактом ключе ($K_{\text{выпр}}$). Далее возвращаемая энергия накапливается в фильтровом конденсаторе (C_2).

Следует обратить внимание на то, что добавление ОКИМ_{3,4} является существенным недостатком однофазной схемы по сравнению с двухфазной, определяемым использованием униполярного ЗППН (без заземленного

нулевого вывода, который может использоваться и как нейтральный). КПД схемы однотактного ТМИП по расчету составил 75%.

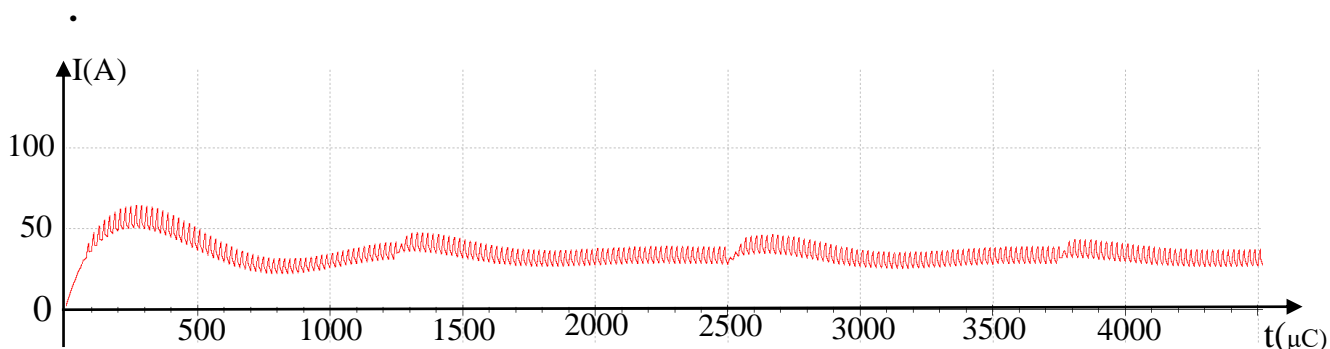


Рис. 11 Осциллограмма тока в левой части схемы при выходе на «режим»

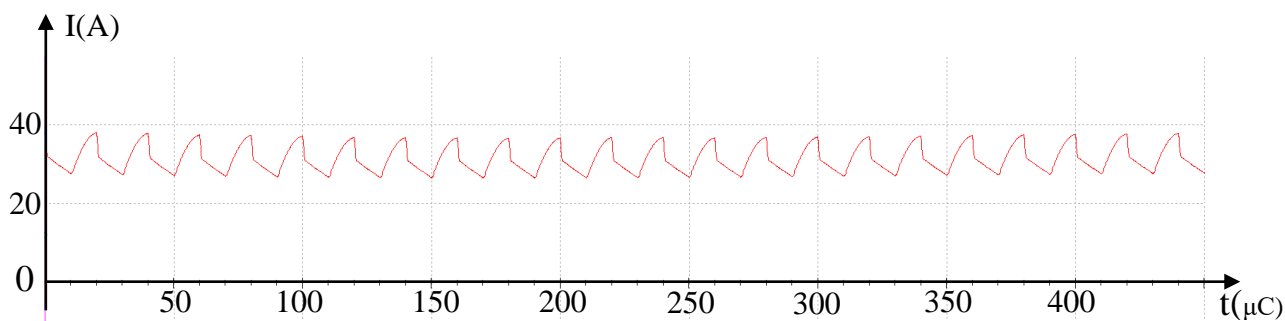


Рис. 12 Осциллограмма тока в левой части схемы в установившемся режиме

Для данной схемы был произведен расчет надежности для разных случаев эксплуатации. Условия эксплуатации выбраны в соответствии с группами по ГОСТ РВ 20.39.304-98: 1.1 (аппаратура стационарных помещений, сооружений); 3.2 (аппаратура дозвуковых самолетов); 5.3 (аппаратура, предназначенная для установки в негерметизированных отсеках, а также на внешней поверхности космических аппаратов с применением мер защиты). Вероятность безотказной работы ОВИЭП составила $P_{\text{ОВИЭП №2 гр. 1.1}} = 0,99873$, $P_{\text{ОВИЭП №2 гр. 3.2}} = 0,98497$, $P_{\text{ОВИЭП №2 гр. 5.3}} = 0,99493$.

Силовая схема смоделированного двухтактного трансформаторного импульсного преобразователя (ТИП) в качестве ОВИЭП в составе ЭЭК КЛА приведена на рис. 13. Она содержит: низковольтный и высоковольтный импульсно-модуляторные коммутаторы (ИМК₁ и ИМК₂); трансформатор прямоугольного тока (ТПТ) с первичной (N₁), вторичной (N₂) и тремя фазными обмотками (N_{3А}, N_{3В}, N_{3С}); балластный двухобмоточный трансреактор (L_{Б1-2}); шины дифференциального звена постоянных повышенных напряжений (ДЗППН); трехфазный симисторный

циклоконвертер (ЦК), уравнильный делитель напряжений (УДН) и стабилизатор напряжения (СтУСБ).

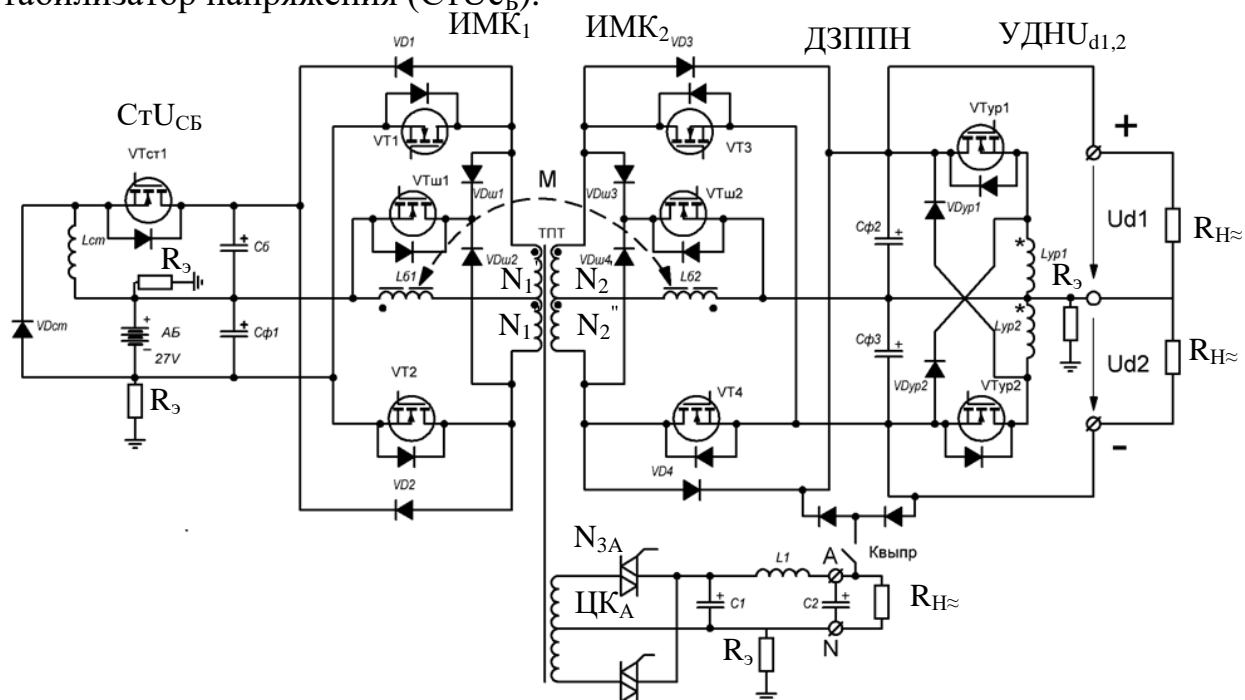


Рис. 13 Схема двухтактного трансформаторного импульсного преобразователя (ТИП) в качестве ОВИЭП в составе ЭЭК КЛА

Недостатками данной схемы являются низкие КПД и надежность характеристики по отношению с первой схемой (однотактной), а также усложненное управление ШИМ-ом регулятором.

К существенным достоинствам предложенной схемы можно отнести следующие:

- обратимость (двунаправленность) преобразования, т.е. возможность питания униполярного звена постоянного повышенного напряжения (ЗППН) или зарядки аккумуляторной батареи;
- обеспечение питанием не только дифференциального звена постоянного повышенного напряжения (ДЗППН), но и нагрузок регулируемого низкочастотного переменного напряжения, в том числе трехфазного (например, синхронных или асинхронных исполнительных электродвигателей, в частности – бортового стартер-генератора);
- данная схема не нуждается в добавлении дополнительных ОКИМ для обратимости (двунаправленности).

На рис. 14 и 15 показаны типовые осциллограммы тока при работе двухтактной схемы.

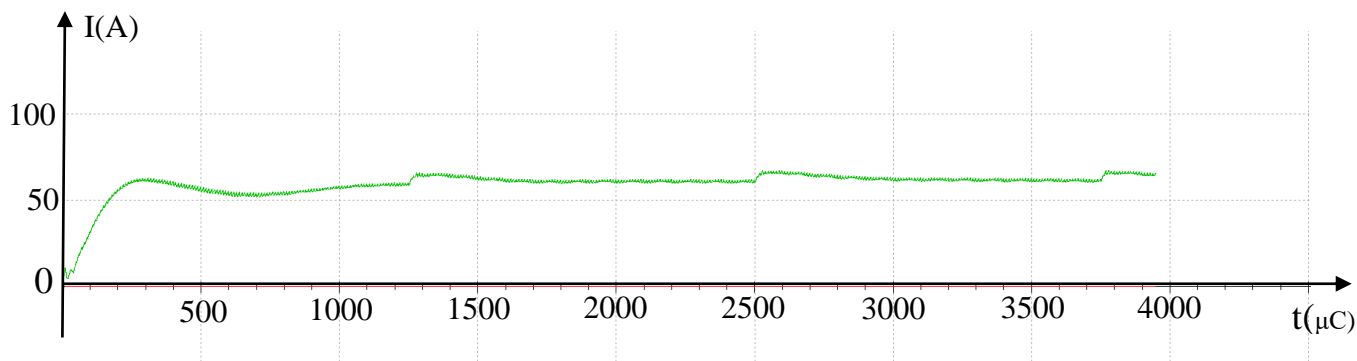


Рис. 14 Осциллограмма тока в левой части схемы при выходе на «режим»

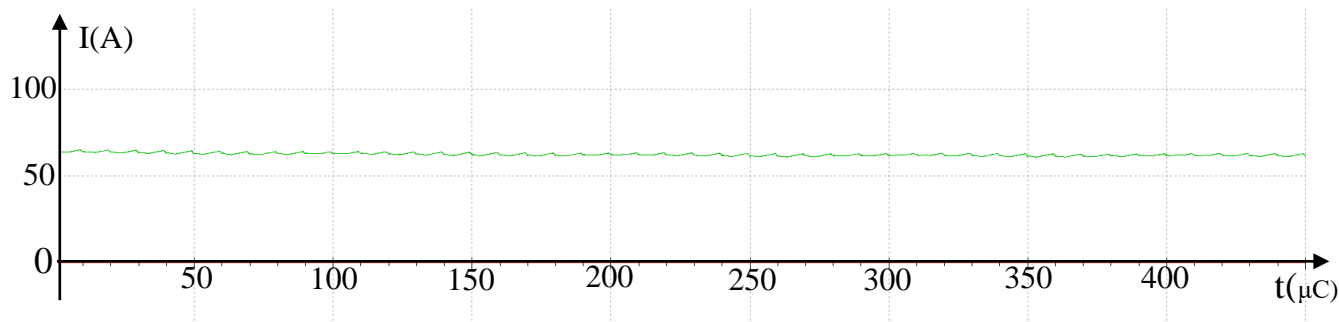


Рис. 15 Осциллограмма тока в левой части схемы в установившемся режиме

КПД схемы двухтактного трансформаторного импульсного преобразователя (ТИП) по расчету составил 60%. Для данной схемы был произведен расчет надежности для разных случаев эксплуатации. Условия эксплуатации выбраны в соответствии с группами по ГОСТ РВ 20.39.304-98: 1.1 (аппаратура стационарных помещений, сооружений); 3.2 (аппаратура дозвуковых самолетов); 5.3 (аппаратура, предназначенная для установки в негерметизированных отсеках, а также на внешней поверхности космических аппаратов с применением мер защиты). Вероятность безотказной работы ОВИЭП составила $P_{\text{ОВИЭП №2 гр. 1.1}} = 0,99805$, $P_{\text{ОВИЭП №2 гр. 3.2}} = 0,97531$, $P_{\text{ОВИЭП №2 гр. 5.3}} = 0,99222$.

Сравнение результатов экспериментов на макетном лабораторном образце и компьютерного моделирования подтвердили работоспособность предлагаемых схем и позволили оценить погрешность моделирования: по мгновенным значениям токов и напряжений не более 11-13%, по интегральным величинам (КПД, накопленная энергия и т.п.) не более 7-9%.

Основные выводы и результаты работы

- Предложен способ совмещения двух преобразований (трансформаторного и трансреакторного), позволяющий улучшить массоэнергетические характеристики устройств.
- Предложен метод использования токозамыкающих пауз при ШИМ-регулировании, позволяющий повысить КПД трансреактора и

применить дуальное управление для повышения статической устойчивости преобразователей с индуктивным накопителем.

- Предложен способ сочленения имитационных, а также расчетно-вычислительных компьютерных моделей импульсных модуляторов-демодуляторов с трансреакторной гальванической развязкой путем введения емкостно-резистивных «квазизвеньев» для демпфирования (интегрирования) внешних токов. Способ позволяет отдельно исследовать процессы в каждом модуляторе-демодуляторе и оптимизировать параметры его элементов и узлов.

- Предложена модернизация реверсивного обратимого непосредственного импульсного конвертора (РОНИК) расширяющая его функциональные возможности за счет двунаправленного режима полярно-инвертирующего понижения/повышения напряжения (режима «дозирования») и позволяющая использовать его схему в качестве унифицированного модуля для широкого класса многофункциональных импульсных преобразователей (МИП) с модульно-масштабируемой архитектурой (но без гальванической развязки).

- Разработаны рекомендации к проектированию обратимых вторичных источников электропитания (ОВИЭП) с повышенной массоэнергетической и надежностной характеристиками.

- Разработаны схемотехнические решения для ОВИЭП на базе двунаправленного конвертора с гальванической развязкой и трехфазного инвертора низкой частоты с трансформаторным звеном прямоугольного тока высокой частоты ($\text{ТЗПТ}_{\text{в/ч}}$) и дифференциального ДИВП с циклоконвертором. Решения защищены приоритетом РФ и предусматривают импортозамещение в номенклатуре используемых изделий импульсной силовой электроники.

- Проведен анализ и на его основе расширен диапазон функциональных возможностей ОВИЭП, позволяющий использовать их для преобразовательных комплексов с модульно-масштабируемой архитектурой (для повышения производственной, монтажной и ремонтно-эксплуатационной технологичности).

- Проведено компьютерно-имитационное моделирование схем одноконтурного и двухконтурного обратимых импульсных преобразователей, подтверждающее работоспособность представленных схемотехнических решений, позволяющее исследовать качество переходных режимов и оптимизировать параметры узлов и элементов.

- Произведен расчет массоэнергетических и надежностных параметров разработанных ВИЭП и их сравнительный анализ.

Исследования позволяют улучшить массоэнергетические и надежность характеристики обратимых вторичных источников электропитания применительно к космическим электроэнергетическим комплексам.

Публикации по теме диссертационной работы

1 С.Б. Резников, И.А. Харченко, К.Н. Храмцов, Н.А. Жегов. Резервно-аккумуляторный источник бесперебойного питания для авиакосмических транспортных электроэнергетических комплексов. Авиакосмическое приборостроение №3, 2017г.

2 С.Б. Резников, И.А. Харченко, К.Н. Храмцов, Н.А. Жегов. Повышение удельной мощности и технологичности и расширение функций авиабортовых зарядно-аккумуляторных устройств. Практическая силовая электроника.

3 С.Б. Резников, И.А. Харченко, А. Сулаков, Н.А. Жегов, К.Н. Храмцов. Трансформаторный импульсный преобразователь для авиакосмической силовой электроники. Силовая электроника, №1, 2017г.

4 Н.А. Жегов, В.Ю. Кириллов. Исследование восприимчивости бортовых кабелей космического аппарата к электромагнитным помехам в СВЧ диапазоне. Труды МАИ, №59, 2012г.

5 В.Ю. Кириллов, Н.А. Жегов, А.В. Клыков, М.М. Томилин. Сравнение расчётных и экспериментальных частотных характеристик эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов. Вестник Московского авиационного института, №4, 2015г.

6 В.Ю. Кириллов, А.В. Клыков, Н.А. Жегов, В.Х. Нгуен, М.М. Томилин. Исследование частотных характеристик моделей сопротивлений связи бортовых кабелей летательных аппаратов. Труды МАИ, №75, 2014г.

7 С.Б. Резников, И.А. Харченко, М.В. Марченко, Н.А. Жегов. Трансформаторные многофункциональные импульсные преобразователи для бортовых авиакосмических источников питания. Вестник Московского авиационного института, №1, 2017г.

8 С.Б. Резников, И.А. Харченко, С.В. Савостьянов, М.В. Марченко, Н.А. Жегов. Обратимые трансформаторные импульсные конверторы для резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания. Силовая электроника, №5, 2016г.

9 М.В. Марченко, В.Ю. Кириллов, Н.А. Жегов, А.В. Клыков, М.М. Томилин. Сравнение методов исследования экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов. Технологии ЭМС, №1, 2015г.

10 С.Б. Резников, д.т.н., И.А. Харченко, к.т.н., К.Н. Храмцов, Н.А. Жегов. Источник бесперебойного питания для авиакосмических и наземно-

транспортных электроэнергетических комплексов. Электроника и электрооборудование транспорта, №4, 2017г.

Список полученных патентов на полезную модель

11 Патент на полезную модель № 167948. Трансформаторный импульсный преобразователь. Резников С.Б., Жегов Н.А., Марченко М.В., Харченко И.А. от 16.09.2016г.

12 Патент на полезную модель Решение № 2016150254 от 09.08.17 Двухтактный трансформаторный импульсный преобразователь. Резников С.Б., Жегов Н.А., Марченко М.В., Харченко И.А.

13 Патент на полезную модель № 172182. Импульсный преобразователь напряжения. Резников С.Б., Жегов Н.А., Марченко М.В., Харченко И.А. от 21.12.2016г.

Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве заключается в следующем: В [1] участие в разработке нетрадиционного схемотехнического решения для резервно-аккумуляторного источника бесперебойного питания (ИБП), предназначенного для авиакосмических электроэнергетических комплексов (ЭЭК). В [2] разработаны соответствующие алгоритмы управления. Решения обеспечивают полное удовлетворение всем критериям по массо-энергитической эффективности и специфическим требованиям для унифицированных модулей многофункциональных импульсных преобразователей с модульно масштабируемой архитектурой. В [3] разработано совместное трансформаторное и трансреакторное преобразование, для повышения КПД преобразователя. В [4] проведены испытания бортовых кабелей и проведен анализ восприимчивости бортовых кабелей космического аппарата к электромагнитным помехам в СВЧ диапазоне, на примере восприимчивости кабелей системы разделения. В [5] проведены испытания для определения экспериментальных частотных характеристик эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов. В [6] проведен анализ частотных диаграмм различных моделей сопротивления связи бортового кабеля летательного аппарата. В [7] участие в разработке нетрадиционных схемотехнических решений для трансформаторных многофункциональных импульсных преобразователей, предназначенных для источников бесперебойного питания в составе бортовых авиакосмических электроэнергетических комплексов (ЭЭК) и систем электроснабжения (СЭС). В [8] компьютерно-имитационное моделирование предложенных схемотехнических решений. В [9] проведено компьютерно-имитационное

моделирование испытываемых кабелей в среде CST Studio и анализ полученных результатов.