

На правах рукописи

ШЕРГИН ВАЛЕРИЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

**СТАТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА БАЗЕ
ПОВЫШАЮЩЕГО ПРОМЕЖУТОЧНОГО ЗВЕНА**

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2011

УДК 621.314

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (государственный технический университет)».

Научный руководитель: д.т.н., проф. Вольский Сергей Иосифович

Официальные оппоненты: д.т.н., доц. Шевцов Даниил Андреевич
к.т.н. Савенков Александр Иванович

Ведущая организация: ОАО АКБ «Якорь», г.Москва

Защита состоится «13» сентября 2011 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета Д 212.125.07 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета)

Автореферат разослан «_____» июня 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Кондратьев А. Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Предъявление к летательным аппаратам (ЛА) следующего поколения высоких требований в части затрат на эксплуатацию, экологичности и топливной эффективности ставит перед специалистами ряд проблем, требующих поиска принципиально новых подходов к построению энергетической системы ЛА. Традиционно на самолетах используются три вторичные энергетические системы: система электроснабжения (СЭС), гидравлическая система и пневматическая система. Недостатками такого подхода являются высокая стоимость обслуживания и эксплуатации, значительные трудности при интеграции бортового оборудования. В связи с этим для перспективных типов ЛА такой подход не является оптимальным.

Одним из наиболее перспективных направлений развития отечественного авиастроения является внедрение концепции «полностью электрического самолета» (ПЭС), что позволит разработать и создать конкурентоспособные самолеты, отвечающие требованиям, предъявляемым к воздушным судам следующего поколения. Основная особенность ПЭС заключается в применении электроэнергии для питания наиболее энергоемких систем, которые традиционно использовали для своего функционирования гидравлическую и пневматическую энергию. На большинстве современных ЛА для управления аэродинамическими поверхностями и взлетно-посадочными устройствами применяется гидравлическая энергия. Система кондиционирования воздуха, противообледенительная система и система запуска авиадвигателя используют пневматическую энергию с источником в виде отбираемого от авиадвигателя сжатого воздуха. Реализация концепции ПЭС позволит минимизировать или полностью исключить централизованную гидросистему самолета и ликвидировать пневмосистему с отбором воздуха от авиадвигателя.

Повышение уровня электрификации ЛА сопровождается увеличением мощности как источников электрической энергии, так и СЭС в целом. В настоящее время наиболее перспективными для ПЭС являются СЭС переменного тока переменной частоты (в диапазоне 360...800 Гц) с номинальным на-

пряжением 230 В и СЭС постоянного тока повышенного напряжения 540 В (двухполярного напряжения ± 270 В).

Концепция ПЭС включает в себя также отказ от механического привода постоянной частоты вращения. Таким образом, бортовыми источниками вырабатывается полностью не кондиционированная электроэнергия переменного или постоянного тока («грязный ток»).

Применительно к СЭС постоянного тока повышенного напряжения, существует необходимость в создании специальных подсистем, которые осуществляют преобразование некондиционированной электроэнергии в электроэнергию со стабилизированными параметрами. Решение такой задачи эффективно достигается посредством применения силовых полупроводниковых преобразователей напряжения с промежуточным звеном повышенной частоты, имеющих трансформаторную гальваническую развязку.

Однако, бортовые полупроводниковые преобразователи на базе современных полупроводниковых элементов до настоящего времени не нашли применения на отечественных разработках ЛА с повышенным уровнем электрификации. По существу, это связано со сложными условиями работы бортовых электротехнических комплексов, учитывая широкий диапазон изменения частоты генерируемого напряжения, высокий уровень коммутационных помех, существенные ограничения в части электромагнитной совместимости. Кроме того, ощущается недостаток теоретических исследований и практической апробации современных полупроводниковых приборов в реальных бортовых электротехнических комплексах ЛА с перспективными СЭС.

В связи с этим, создание бортового статического преобразователя на базе современных полупроводниковых приборов, разработка схемотехнических решений и компьютерных моделей, исследование и анализ рабочих процессов, выработка алгоритма проектирования и рекомендаций для реализации разработанных теоретических положений, их практическая апробация и опытно-промышленное освоение является актуальной и важной научно-технической задачей.

Цели и задачи работы. Целью работы является повышение технико-экономических показателей перспективных бортовых СЭС подвижных объектов, в том числе ЛА, создаваемых в рамках концепции ПЭС, путем создания энергоэффективных бортовых преобразователей электроэнергии.

Для достижения указанной цели решены следующие задачи:

1 Анализ принципов построения бортовых статических преобразователей транспортного применения.

2 Классификация структурных схем статических преобразователей собственных нужд применительно к перспективным СЭС подвижных объектов.

3 Разработка схемотехнических решений, направленных на повышение надежности преобразователей за счет снижения тепловых потерь в полупроводниковых приборах.

4 Разработка законов управления силовыми ключами, позволяющих уменьшить габариты устройства и снизить уровень тепловых потерь.

5 Математическое описание и анализ рабочих процессов в разработанном блоке конвертора с малыми потерями (КМП), используемом в качестве входного стабилизатора в выбранной схеме преобразователя.

6 Вывод аналитических уравнений и анализ потерь мощности в полупроводниковых приборах для различных силовых схем КМП.

7 Компьютерное моделирование и анализ рабочих процессов в разработанной схеме КМП.

8 Разработка алгоритма расчета силовых схем статических преобразователей на основе КМП.

9 Экспериментальная проверка полученных расчетно-теоретических положений и результатов компьютерного моделирования.

Методы исследования. При решении поставленных задач в диссертационной работе использованы общепринятые в электротехнике и теории электрических цепей аналитические методы, методы математического анализа, элементы матричной алгебры, современные средства компьютерного моделирования и экспериментальные методы исследований.

Для математического исследования рабочих процессов в одно- и многоуровневых КМП применялся многофункциональный математический пакет MathCAD. Для компьютерного моделирования предложенных схем использовалась программная среда визуального моделирования CASPOC. При проектировании КМП применялись САПР-пакеты AutoCAD и NanoCAD.

Достоверность теоретических положений и полученных результатов компьютерного моделирования подтверждена экспериментальными исследованиями на макетных образцах. Весь комплекс исследований при участии автора был проведен на специально разработанном на предприятии ООО «Трансконвертер» универсальном испытательном стенде СИП200.

Научная новизна. При решении задач, поставленных в диссертационной работе, получены следующие научные результаты:

1 Предложена концепция построения многоуровневой схемы КМП, совмещающая в себе принцип коммутации ключей при нулевом токе и многоуровневую структуру.

2 Разработаны асинхронные и синхронные законы управления применительно к различным схемам построения КМП.

3 Получены математические описания электромагнитных процессов и расчетные выражения для одно- и многоуровневых схем КМП.

4 Составлена обобщенная система уравнений КМП и выведены решения системы для всех состояний схемы.

5 Разработаны компьютерные модели одноуровневого и многоуровневого повышающего конвертора, одноуровневого и многоуровневого КМП с синхронным и асинхронным законами управления.

6 Получены аналитические уравнения для определения тепловых потерь в различных силовых схемах КМП.

7 Разработаны виртуальные модули для пакета CASPOC, позволяющие определять статические и динамические потери в полупроводниковых приборах на основе заданных характеристик приборов.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

1 Разработанные новые схмотехнические решения построения бортовых преобразователей электроэнергии на базе КМП обеспечивают повышение технико-экономических показателей перспективных электротехнических комплексов подвижных объектов, в частности обеспечивают снижение потерь в полупроводниковых силовых ключах входного стабилизирующего звена до 20%.

2 Предложенные компьютерные модели одно- и многоуровневого повышающего конвертора, одно- и многоуровневого КМП с синхронным и асинхронным законами управления снижают временные затраты на исследование и анализ протекающий в устройствах рабочих процессов.

3 Составленные виртуальные компьютерные модули для расчета статических и динамических потерь в полупроводниковых приборах позволяют производить предварительный анализ и выбор типов схем и силовых приборов при проектировании статических преобразователей в условиях постоянного совершенствования элементной базы.

4 Разработанный универсальный испытательный стенд обеспечивает проведение экспериментальных исследований полупроводниковых преобразователей электроэнергии в широком диапазоне входных напряжений и выходных нагрузок.

5 Предложенный асинхронный закон управления КМП позволяет снизить массу входного дросселя на 25...30%, что имеет важное значение для бортовых электротехнических комплексов.

Реализация результатов работы. Разработанные классификации, схемы, математическое описание, модели и алгоритмы используются в учебном процессе на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Московского авиационного института.

Результаты диссертационной работы легли в основу серийного выпуска статических преобразователей на базе повышающего промежуточного звена для подвижного состава железных дорог. В настоящее время подвижной со-

став с разработанными преобразователями успешно эксплуатируется на Московской, Западно-Сибирской, Северо-Кавказской и Южно-Уральской железных дорогах.

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы теоретические и практические результаты внедрены в практику проектирования на ООО «Трансконвертер» (г. Москва), ООО «Трансэлкон» (г. Москва) и ЗАО «Трансмашхолдинг». В частности, многие разработанные подходы использовались в процессе опытно-конструкторских работ по бортовым электротехническим комплексам для перспективного электропоезда ЭД10 с асинхронным тяговым приводом.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2006 г.), 15-й международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, 2009 г.), научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (г. Одесса, 2008 г.), International Power Electronics and Motion Control Conference (г. Шанхай, 2006 г.) и International Conference for Power Conversion, Intelligent Motion and Power Quality (г. Нюрнберг, 2007 г.)

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 4 – в изданиях, рекомендуемых ВАК к публикации основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата технических наук. Получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и 3 приложений. Основная часть диссертации содержит 203 страницы машинописного текста, включая 70 рисунков и 3 таблицы. Библиографический список включает 104 наименования, в том числе 46 на иностранных языках. Общий объем диссертационной работы составляет 219 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертации, определены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведены сведения об апробации и публикациях, представлена структура диссертационной работы.

В первой главе дан обзор существующих принципов построения бортовых систем электроснабжения со статическими преобразователями, а также перспектив их развития. На основе проведенного анализа разработана классификация силовых схем преобразователей электроэнергии с нестабилизированным высоким входным напряжением по следующим признакам: по способу преобразования электрической энергии, по стабилизации на стороне первичной или вторичной обмотки трансформатора, по стабилизации напряжения постоянного или переменного тока и по типу звена, в котором производится регулирование.

Определены области применения силовых схем с промежуточным звеном повышенной частоты и с непосредственным преобразованием. С учетом ряда преимуществ (использование одного накопительного реактора для многоуровневых схем, возможность активной коррекции гармонического состава потребляемого тока) сделан вывод о целесообразности применения во входном стабилизирующем звене схемы повышающего конвертора.

С учетом возрастающих требований к энергоэффективности современных преобразователей электроэнергии проведен анализ основных способов снижения динамических потерь в полупроводниковых приборах: коммутации при нулевом напряжении и коммутации при нулевом токе. Обоснована рациональность использования конвертора с малыми потерями (КМП), содержащего многоуровневый каскад последовательных ячеек повышающего конвертора и один вспомогательный контур коммутации с утилизацией индуктивности рассеяния трансреактора в целях обеспечения мягкой коммутации силовых ключей (рисунок 1).

Проведен анализ двух основных принципов управления полупроводниковыми ключами: синхронного и асинхронного. Сделан вывод о целесообразности применения в высоковольтных многоуровневых преобразователях предложенной схемы КМП с использованием одного дополнительного контура коммутации и силового трансреактора, которая позволяет существенно снизить динамические потери в силовых транзисторах и реализовать асинхронный алгоритм управления силовыми транзисторами.

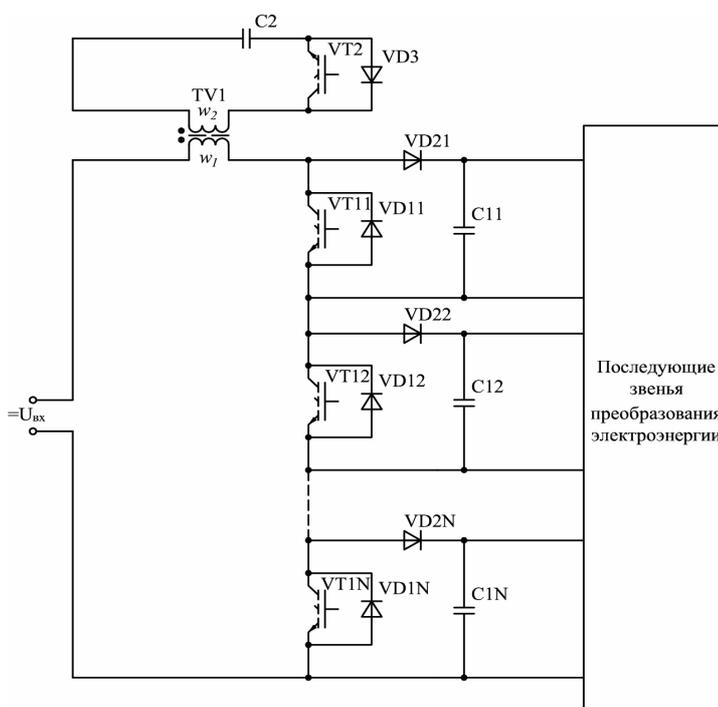


Рисунок 1. Обобщенная схема преобразователя на базе многоуровневого КМП

Во второй главе диссертации проведено исследование рабочих процессов в предложенной схеме одноуровневого КМП, составлено математическое описание и получены расчетные выражения для определения параметров схемы. В целях понижения порядка решаемых уравнений и наглядности полученных результатов был сделан ряд допущений и составлена эквивалентная схема замещения КМП (рисунок 2).

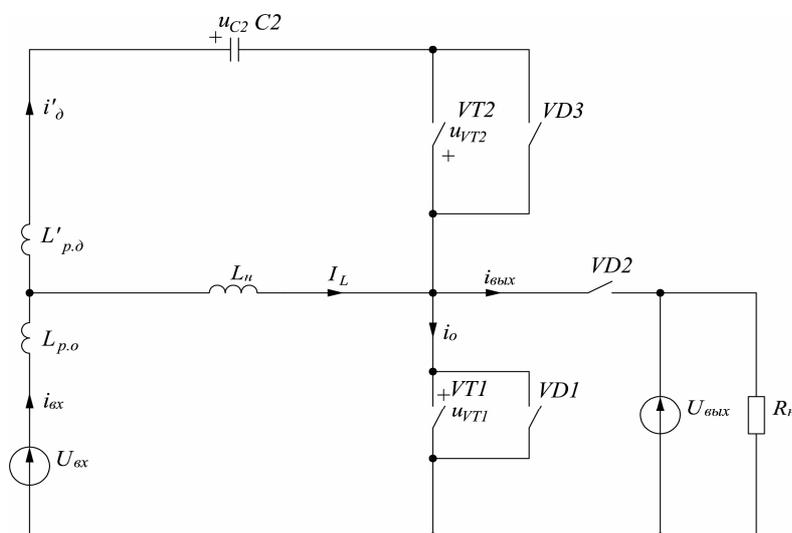


Рисунок 2. Эквивалентная схема замещения одноуровневого КМП

С целью осуществления поинтервального анализа рабочих процессов в силовой схеме КМП составлена обобщенная система уравнений:

$$\begin{cases} i_{\text{вх}}(t) - i'_{\delta}(t) \cdot G_{\delta}(t) - I_L = 0, & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i'_{\delta}(t) \cdot G_{\delta}(t) + I_L - i_{\text{вых}}(t) \cdot G_{VD2}(t) - i_o(t) \cdot G_o(t) = 0, & (2) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{\text{вх}} - u_{Lp.o}(t) - u'_{Lp.\delta}(t) - u'_{C2}(t) + u'_{VT2}(t) \cdot \bar{G}_{\delta}(t) - u_{VT1}(t) \cdot \bar{G}_o(t) = 0, & (3) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{\text{вых}} - u_{VT1}(t) \cdot \bar{G}_o(t) - u_{VD2}(t) \cdot \bar{G}_{VD2}(t) = 0, & (4) \end{cases}$$

в результате решения которой для всех интервалов работы схемы, получено обобщенное выражение для токов:

$$\mathbf{I} = \mathbf{G}_1 I_L + \mathbf{G}_2 \left(\frac{U_{\text{вых}}}{Z_1} - I_L \right) \sin \omega_1 t - \mathbf{G}_3 I_L \cos \omega_1 t, \quad (5)$$

а также для напряжений:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} = & \mathbf{G}_4 U_{\text{вх}} + \mathbf{G}_5 U_{\text{вых}} + \mathbf{G}_6 (U_{\text{вых}} - I_L Z_1) \cos \omega_1 t - \mathbf{G}_7 I_L Z_1 \sin \omega_1 t + \\ & + \mathbf{G}_8 \left(U_{\text{вых}} \sqrt{1 - \frac{2I_L Z_1}{U_{\text{вых}}}} + \frac{I_L}{C'_2} t \right) + \mathbf{G}_9 I_L Z_1. \end{aligned} \quad (6)$$

Получены расчетные выражения коэффициента передачи по напряжению:

$$\frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{1 - \gamma_o + \frac{\Delta t_4}{2T_o} \left(\sqrt{1 - \frac{2I_L Z_1}{U_{\text{вых}}}} - 1 \right)}, \quad (7)$$

среднего значения тока трансреактора:

$$I_L = I_n \frac{1}{1 - \gamma_o - \frac{\Delta t_4}{T_o} + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{T_1}{T_o}}, \quad (8)$$

а также для определения требуемой емкости вспомогательного конденсатора и индуктивности намагничивания трансреактора:

$$C_2 > \frac{4(L'_{p.\delta} + L_{p.o}) \cdot I_n^2 \cdot k_T^2}{U_{\text{вых}}^2 (1 - \gamma_o)^2}, \quad (9)$$

$$L_n \geq \left(\frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} \right)^2 \frac{T_o (U_{\text{вых}} - U_{\text{вх}})}{I_n \left(k_{II.\max} - \frac{k_{p.o}}{1 - k_{p.o}} \right)}. \quad (10)$$

Определены соотношения для расчета статических и динамических потерь в силовых и вспомогательных полупроводниковых ключах одноуровневого КМП. В целях оценки эффективности применения КМП по сравнению с классическим повышающим конвертором осуществлен сравнительный анализ статических, динамических и суммарных потерь для данных типов конверторов. В результате анализа сделан вывод о преимуществе КМП по суммарным потерям мощности на более высоких частотах коммутации.

В третьей главе диссертационной работы составлено математическое описание многоуровневого КМП, проведен анализ рабочих процессов в силовой схеме и определены расчетные соотношения для элементов схемы.

С целью определения отличий общего решения многоуровневого КМП от одноуровневого были рассмотрены процессы на примере двухуровневой схемы, последующее выявление зависимостей в которой позволило получить основные соотношения для схемы многоуровневого КМП.

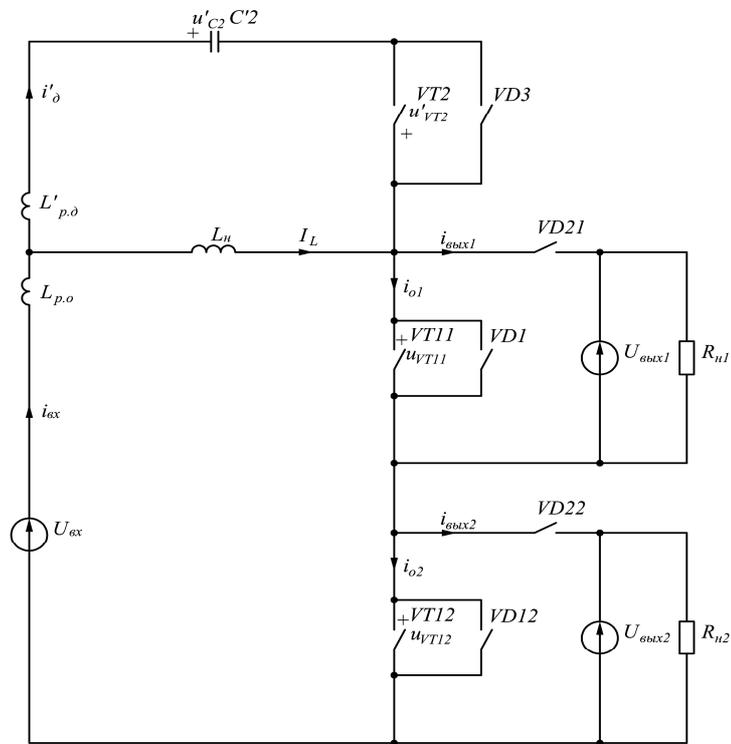


Рисунок 3. Эквивалентная схема замещения двухуровневого КМП

На основании эквивалентной схемы замещения (рисунок 3) двухуровневого КМП была составлена обобщенная система уравнений:

$$\begin{cases} i_{ox}(t) - i'_d(t) \cdot G_d(t) - I_L = 0, & (11) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i'_d(t) \cdot G_d(t) + I_L - i_{bvx1}(t) \cdot G_{VD21}(t) - i_{o1}(t) \cdot G_{o1}(t) = 0, & (12) \end{cases}$$

$$\begin{cases} i_{bvx1}(t) \cdot G_{VD21}(t) + i_{o1}(t) \cdot G_{o1}(t) - i_{bvx2}(t) \cdot G_{VD22}(t) - i_{o2}(t) \cdot G_{o2}(t) = 0 & (13) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{ox} - u_{Lp.o}(t) - u'_{Lp.d}(t) - u'_{C2}(t) + u'_{VT2}(t) \cdot \bar{G}_d(t) - \\ - u_{VT11}(t) \cdot \bar{G}_{o1}(t) - u_{VT12}(t) \cdot \bar{G}_{o2}(t) = 0, & (14) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{bvx1} - u_{VT11}(t) \cdot \bar{G}_{o1}(t) - u_{VD21}(t) \cdot \bar{G}_{VD21}(t) = 0, & (15) \end{cases}$$

$$\begin{cases} U_{bvx2} - u_{VT12}(t) \cdot \bar{G}_{o2}(t) - u_{VD22}(t) \cdot \bar{G}_{VD22}(t) = 0, & (16) \end{cases}$$

в результате решения которой получены аналитические уравнения рабочих процессов на всех интервалах работы схемы двухуровневого КМП.

Также получены выражения для расчета коэффициента передачи по напряжению, среднего значения тока трансреактора и параметров дополнительного контура коммутации. Показано, что требуемая индуктивность намагничивания трансреактора для двухуровневой схемы в 2,5 – 3 раза меньше, чем для одноуровневой.

На основе анализа разработанного математического описания и полученных выражений выявлены зависимости, связывающие рабочие соотношения для одноуровневого и многоуровневого КМП с количеством уровней m . При этом было принято допущение, что собственная резонансная частота контура на стороне вторичной обмотки входного трансреактора много выше частоты коммутации основного контура.

При синхронном законе управления силовыми ключами основные выражения для многоуровневой схемы имеют тот же вид, что и для одноуровневой. В случае асинхронного закона управления соотношение для коэффициента передачи схемы m -уровневого КМП по напряжению выведено как:

$$\frac{U_{\text{вых1}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{1}{m(1 - \gamma_o)}, \quad (17)$$

что совпадает с коэффициентом передачи по напряжению для m -уровневого классического повышающего конвертора.

Выражения для минимально допустимого значения емкости вспомогательного конденсатора и требуемого значения индуктивности намагничивания трансреактора для многоуровневого КМП определены как:

$$C_2 > k_p L_n \cdot \left(\frac{2mk_T I_n}{U_{\text{вх}}} \right)^2, \quad (18)$$

$$L_n \geq \frac{T_o (U_{\text{вх}} - (m-1)U_{\text{вых1}})(mU_{\text{вых1}} - U_{\text{вх}})}{mU_{\text{вых1}} I_n \left(k_{\text{II.max}} - \frac{k_{p.o}}{1 - k_{p.o}} \right)}. \quad (19)$$

Проведен сравнительный анализ статических и динамических потерь мощности для двухуровневого и одноуровневого КМП и двухуровневого классического повышающего конвертора (рисунок 4), в результате которого получены следующие выводы:

- увеличение числа уровней в два раза позволяет добиться примерно двукратного снижения динамических потерь при той же частоте коммутации;
- величина суммарных потерь двухуровневого КМП в среднем на 35...65% ниже, чем одноуровневого КМП;

- использование схемы двухуровневого КМП в качестве входного звена позволяет добиться повышения частоты тока входного реактора в четыре раза при том же среднем уровне суммарных потерь, что и для одноуровневой схемы КМП.

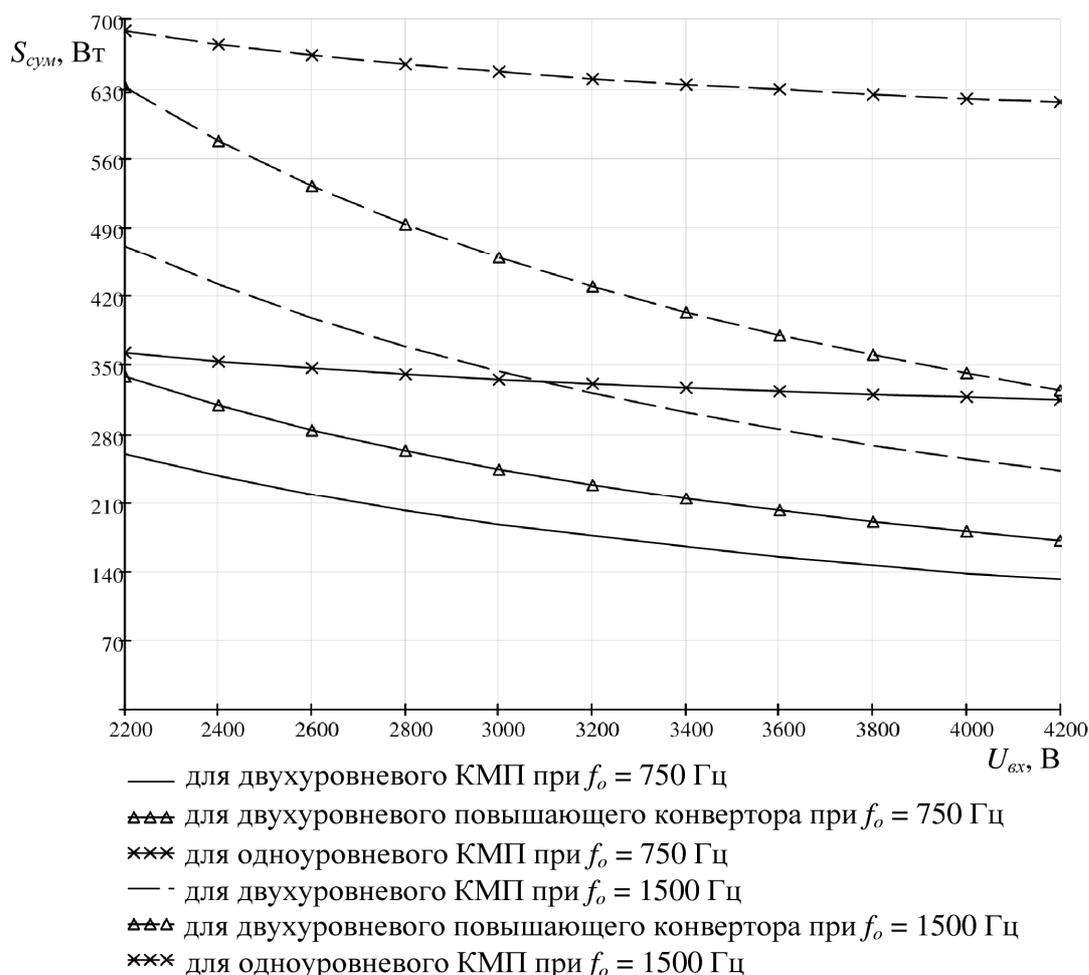


Рисунок 4. Сравнительный анализ суммарных потерь мощности одно- и двухуровневых классического повышающего конвертора и КМП

Четвертая глава диссертации посвящена компьютерному моделированию КМП и экспериментальному подтверждению результатов исследований. С использованием пакета программ для визуального моделирования CASPOC были разработаны компьютерные модели одноуровневого и двухуровневого КМП. В качестве примеров на рисунках 5 и 6 показаны компьютерные модели силовой схемы и системы управления одноуровневого КМП.

Разработаны виртуальные блоки, реализующие в автоматическом режиме постоянный расчет и индикацию значения мощности динамических и статических потерь в полупроводниковых ключах. Разработанную компьютерную модель рационально использовать для составления алгоритма работы системы управления создаваемых силовых схем на базе КМП.

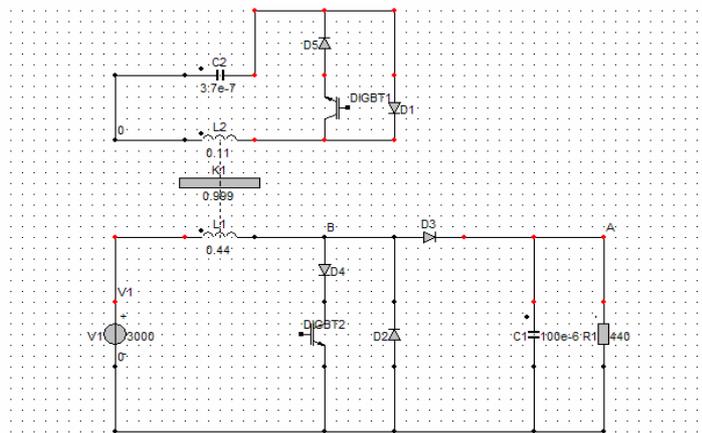


Рисунок 5. Компьютерная модель силовой схемы одноуровневого КМП

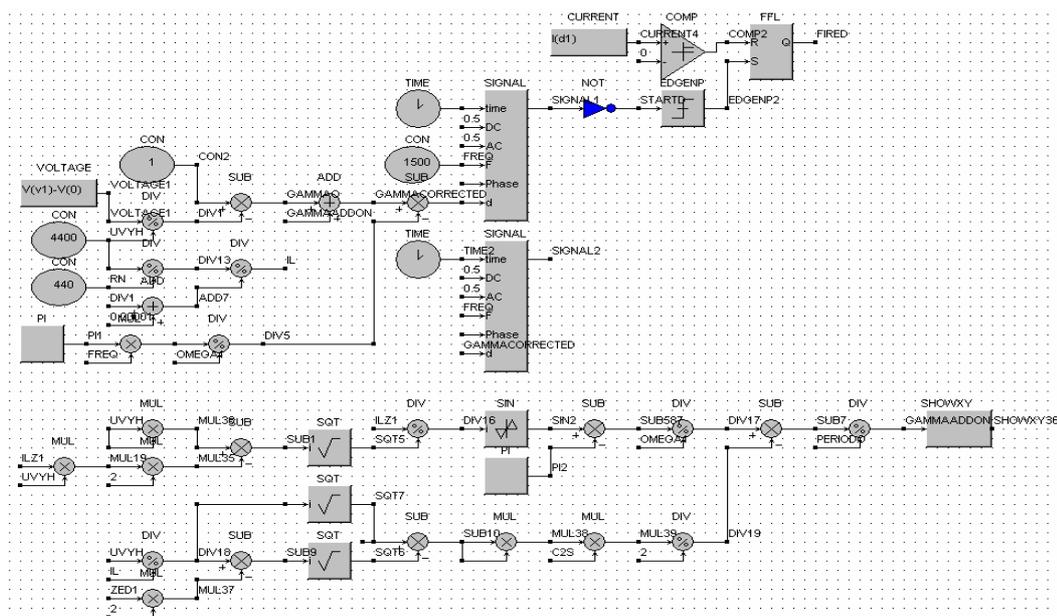


Рисунок 6. Компьютерная модель части системы управления одноуровневого КМП

Составлен алгоритм расчета параметров силовой схемы КМП, позволяющий определить оптимальное сочетание параметров силовой схемы по критерию мощности потерь при заданном значении массы основных силовых элементов устройства и выполнить компьютерную проверку работы схемы с выбранными параметрами.

В рамках экспериментальных исследований КМП был изготовлен макетный образец статического преобразователя выходной мощностью 80 кВА (рисунок 7). Экспериментальные исследования проводились на специально изготовленном на ООО «Трансконвертер» универсальном испытательном стенде СИП200, который позволяет проводить весь спектр электрических испытаний статических преобразователей.

Снятые в результате эксперимента характеристики (рисунки 8 и 9) имеют незначительные расхождения (не более 6%) с расчетными результатами. В дальнейшем полученные результаты использованы при проектировании преобразователей собственных нужд на базе повышающего промежуточного звена для подвижного состава железных дорог.

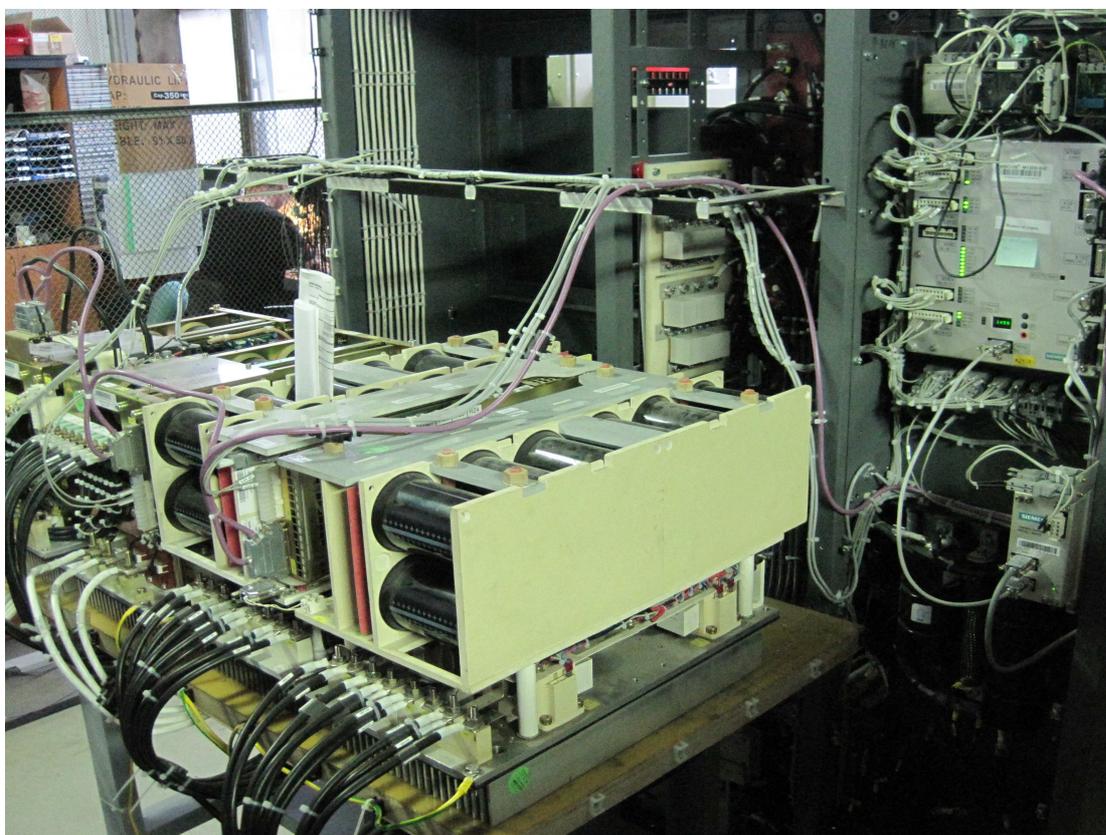


Рисунок 7. Макетный образец статического преобразователя на основе КМП.

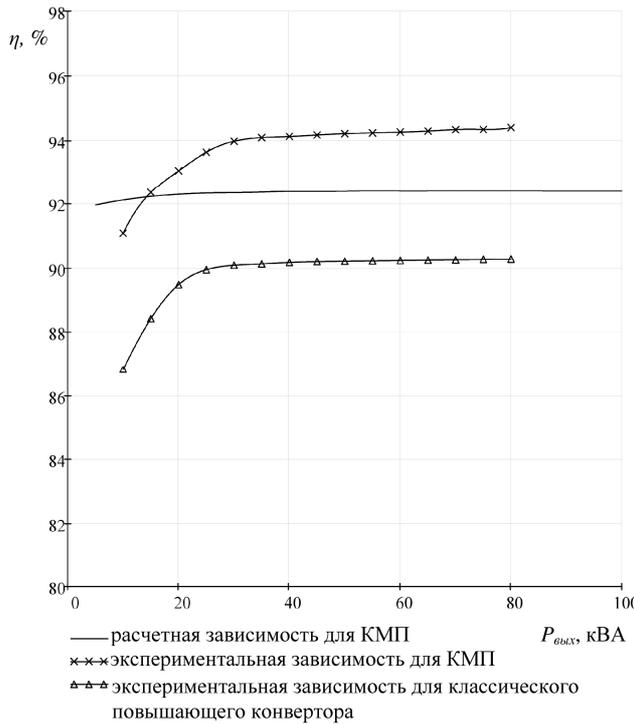


Рисунок 8. Расчетные и экспериментальные зависимости КПД от выходной мощности для КМП и повышающего конвертора

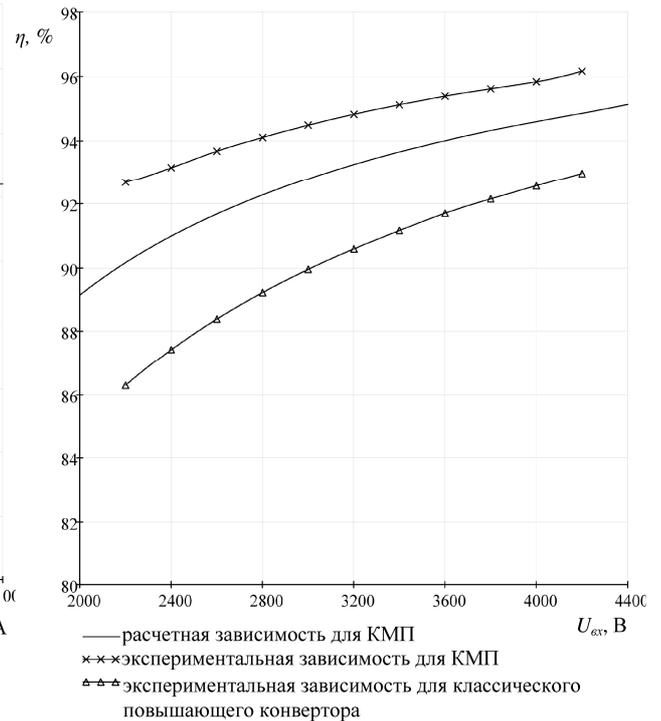


Рисунок 9. Расчетные и экспериментальные зависимости КПД от входного напряжения для КМП и повышающего конвертора

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Диссертационная работа способствует решению важной научно-технической задачи по созданию бортового статического преобразователя электроэнергии с использованием современных полупроводниковых приборов, разработке схемотехнических решений и компьютерных моделей, исследованию и анализу рабочих процессов, выработке алгоритма проектирования и рекомендаций для реализации разработанных теоретических положений, их практической апробации и опытно-промышленному освоению.

2 Проведенный сравнительный анализ принципов построения бортовых статических преобразователей и разработанная классификация силовых схем преобразователей с нестабилизированным высоким входным напряжением позволяют составлять структурные схемы, обеспечивающие наибольший положительный эффект в части организации нескольких выходных каналов, резервированию и снижению массы и габаритов преобразователя.

3 Применение принципа КМП в высоковольтных многоуровневых преобразователях с использованием одного дополнительного контура коммутации и силового трансреактора дает существенный эффект в части снижения динамических потерь в силовых транзисторах и обеспечивает реализацию асинхронного алгоритма управления силовыми транзисторами.

4 Увеличение числа уровней схемы КМП позволяет добиться значительного снижения динамических потерь при той же частоте коммутации. В частности, величина суммарных потерь двухуровневого КМП в среднем на 25...35% ниже, чем одноуровневого КМП.

5 Использование схемы n -уровневого КМП в качестве входного звена повышает частоту тока входного силового реактора в n^2 раз при том же среднем уровне суммарных потерь, как у одноуровневой схемы КМП, что обеспечивает существенное снижение массогабаритных параметров электромагнитных устройств и преобразователя в целом.

6 Составленное математическое описание схемы КМП позволяет проводить анализ рабочих процессов, осуществлять расчет и выбор параметров элементов с достаточной для инженерных расчетов точностью. Предложенные подходы математического описания эффективны для исследования режимов функционирования разрабатываемых на базе КМП устройств.

7 Разработанные компьютерные модели являются эффективным инструментом для проверки функционирования создаваемых на базе КМП устройств, оценки рациональности использованных решений и составления алгоритма работы системы управления проектируемых преобразователей.

8 Разработанный алгоритм расчета параметров КМП позволяет определять рациональное сочетание параметров силовой схемы и обеспечивает гибкий подход к проектированию силовых схем в условиях постоянного совершенствования полупроводниковой элементной базы.

9 Проведенные экспериментальные исследования подтверждают работоспособность разработанного макетного образца одноуровневого КМП,

справедливость основных теоретических положений и результатов компьютерного моделирования.

10 Результаты диссертационной работы положены в основу серийного выпуска статических преобразователей на базе повышающего промежуточного звена для подвижного состава железных дорог. В настоящее время разработанные преобразователи установлены на электропоездах серии ЭД4МКМ-АЭРО и пассажирских вагонах повышенной комфортности. Разработанные подходы использовались в процессе опытно-конструкторских работ по бортовым электротехническим комплексам для перспективного электропоезда ЭД10 с асинхронным тяговым приводом.

Основные положения диссертации нашли отражение в следующих научных трудах:

1 Шергин В.Е. Разработка универсального высоковольтного испытательного стенда для электрооборудования железнодорожного транспорта // 12-я международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: тезисы докладов. Том 2. М.: МЭИ, 2006. с.205–207.

2 Shergin V.Y., Volsky S.I., Skorokhod Y.Y. The Analysis and Simulation of Power Circuits for High Voltage Converter // Proceedings IPEMC 2006. Shanghai, 2006. p. 1133-1137.

3 Shergin V.Y., Skorokhod Y.Y., Volsky S.I. The Analysis and Simulation of Power Circuits for a High Voltage Converter // Proceedings PCIM Europe 2007. Nuremberg, 2007. p. 351–356.

4 Шергин В.Е. Анализ преимуществ многозвенной схемы статического преобразователя электроэнергии // Сборник научных трудов по материалам научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2008», том 6. Одесса: Черноморье, 2008. с. 71–80.

5 Шергин В.Е., Петрашевская А.А. Уменьшение габаритов реакторов в статических преобразователях электроэнергии // 15-я международная

научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»: тезисы докладов. Том 2. М.: МЭИ, 2009. с.201–202.

6 Шергин В.Е. Математическое исследование различных типов схем статического преобразования электроэнергии // Электронный физико-технический журнал. 2009. Том 4. с. 35–47. URL: <http://eftj.secna.ru> (дата обращения: 30.03.2011).

7 Шергин В.Е., Скороход Ю.Ю. Перспективные схемы стабилизации напряжения для СЭС полностью электрического самолета // Авиакосмическое приборостроение. 2009. №8. с. 13–21.

8 Шергин В.Е. Анализ асинхронного способа управления транзисторами в многоуровневом повышающем конверторе // Известия Челябинского научного центра Уральского отделения Российской Академии Наук, вып. 4 (46), 2009. с. 22–27.

9 Шергин В.Е., Скороход Ю.Ю. Анализ входных силовых схем преобразователя для перспективных систем электроснабжения ЛА // Вестник МАИ. №5, 2009. с. 101–110.

10 Шергин В.Е., Петрашевская А.А., Ниткин Д.А. Внедрение системы резервирования статических преобразователей по входному высокому напряжению // Вестник РГУПС. 2010. №2 (38). с. 105–111.

11 Шергин В.Е., Вольский С.И., Петрашевская А.А., Скороход Ю.Ю. Математическая модель высоковольтного преобразователя с дополнительным контуром коммутации // Электричество. 2010. №8. с. 25–33.

12 Шергин В.Е. Как повысить стабильность работы статических преобразователей // Локомотив. 2010. №9 (645). с. 40–42.

13 Патент РФ №92582 от 25.12.2009. Преобразователь напряжения постоянного тока / Шергин В. Е., Вольский С. И., Скороход Ю. Ю.