

*На правах рукописи*



Скороход Юрий Юрьевич

**ВХОДНЫЕ КАСКАДЫ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ  
БОРТОВЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 2.4.2.

Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва, 2026 г.

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 310 «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» и в Обществе с ограниченной ответственностью «Трансконвертер».

**Научный руководитель:** **Вольский Сергей Иосифович**, доктор технических наук, профессор, профессор ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

**Официальные оппоненты:** **Воронин Сергей Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, старший научный сотрудник «РМЛ электромеханических, электронных и электрохимических систем» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

**Глызин Илья Игоревич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела электроснабжения АО «Научно-Исследовательский Институт Железнодорожного Транспорта» (АО «ВНИИЖТ»)

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» имени А.Г. Иосифьяна» (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

Шифр диссертационного совета 24.2.327.11 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

Защита состоится « 4 » декабря 2026 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.327.11, созданного на базе ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте: [https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=186345](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186345).

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 202 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.11,

д.т.н., профессор РАН

А. В. Кривилев

## 1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность темы научных исследований.** В настоящее время в бортовых электротехнических комплексах в качестве источников питания (ИП) все чаще применяются статические преобразователи электроэнергии, основанные на импульсном преобразовании электрической энергии. Этот способ преобразования электроэнергии дает выигрыш по массогабаритным показателям, стоимости обслуживания и надежности перед электромеханическим способом. Одним из направлений применения импульсного преобразования электроэнергии являются преобразователи собственных нужд (ПСН), которые используются на железнодорожном подвижном составе. Такие ПСН преобразуют высоковольтное напряжение 3000 В контактной сети в напряжения 3 ~ 50 Гц 380 В; 3 ~ 50 Гц 220 В; 1~400 Гц 600 В; --- 110 В и другие, необходимые для питания различных нагрузок. При этом следует отметить, что напряжение контактной сети может изменяться в широком диапазоне порядка 30 % от номинального значения. Так, согласно ГОСТ 6962–75, напряжение контактной сети постоянного тока может изменяться в диапазоне от 2200 до 4000 В, а действующее значение напряжения однофазной сети переменного тока может изменяться в диапазоне от 2200 до 3800 В, 50 Гц.

С целью обеспечения безопасности от поражения электрическим током, ПСН должен обеспечивать также гальваническую развязку между контактной сетью и нагрузкой, что усложняет электрическую схему преобразования и снижает его КПД, который не должен быть меньше значения 0,9 при номинальной мощности согласно п. 4.5.3 ГОСТ 33726–2016.

Также к ПСН предъявляют повышенные требования к качеству потребляемого тока. Превышение параметров по содержанию высших гармонических составляющих во входном токе ПСН может привести к несанкционированному срабатыванию стрелочных переводов и светофоров на железнодорожных путях. Основным параметром, определяющим качество входного тока, является действующее значение высших гармонических составляющих, которые определяются частотой преобразования электрической энергии, значением индуктивности входного дросселя и алгоритмом управления силовыми ключами ПСН. При этом частота работы силовых ключей ограничена динамическими потерями и возможностями системы управления. Значение индуктивности входного дросселя обычно ограничено массогабаритными показателями и стоимостью всего устройства.

В высоковольтных преобразователях особенно остро стоят задачи оптимизации частоты коммутации силовых ключей, так как потери при переключении силовых ключей при работе на высоком напряжении исключительно высокие.

Аналогичные задачи возникают также при создании авиационных и морских ИП с высоковольтным входным напряжением для бортовых электротехнических комплексов. В связи с этим научные исследования в области создания высоковольтных импульсных преобразователей, обеспечивающих электромагнитную совместимость с инфраструктурой, требуемые энергетические и массогабаритные показатели ИП как для железнодорожного транспорта, так и для других применений при широком изменении параметров входного

высоковольтного напряжения определяют актуальность темы диссертационной работы.

В настоящее время теории статических импульсных преобразователей посвящены многие научно-исследовательские работы и разработки таких известных ученых, как Г.М. Мустафа, Г. С. Зиновьев, В.С. Моин, В. И. Мелешин, Е. Е. Чаплыгин, П. А. Бачурин, И. А. Харченко, С. А. Харитонов, С. Б. Резников, Б. Ф. Дмитриев, С. Я. Галушин, В. В. Бочаров, И. Ю. Краснов, В. В. Литовченко, Д. А. Шевцов, Tu A Rong Jie, J. W. Kolar, U. Drogenik, I. Moir, F. C. Zach, T. Friedli и другие. Эти исследования послужили научной основой для постановки научно-технических задач данной диссертационной работы.

При исследовании рассмотрена входная часть высоковольтного преобразователя с использованием импульсного преобразования переменного однофазного и постоянного тока в постоянный, которая при широком диапазоне изменения напряжения контактной сети позволяет обеспечить требуемое содержание высших гармонических во входном токе, приемлемые КПД и массогабаритные показатели устройства, что при практической реализации имеет народно-хозяйственное значение.

**Целью диссертационной работы** является разработка входного каскада высоковольтного преобразователя для бортовых электротехнических комплексов с повышенными требованиями к массогабаритным показателям и к качеству потребляемых токов применительно к железнодорожному составу рельсового транспорта.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

1. Осуществлен выбор силовой схемы входного каскада высоковольтного преобразователя однофазного переменного и постоянного тока в постоянный (в дальнейшем именуемого ВП) с потреблением электрической энергии повышенного качества.

2. Исследованы рабочие процессы выбранной силовой схемы входного каскада ВП в режиме повышения качества входного постоянного и переменного тока.

3. Разработана имитационная компьютерная модель предложенной силовой схемы.

4. Исследовано влияние использования силовых полупроводниковых ключей различных классов по напряжению на мощность потерь предложенного входного каскада и параметры входного дросселя в ВП.

5. Проведена верификация полученных аналитических результатов посредством компьютерных и экспериментальных исследований.

**Методы исследования.** При решении поставленных в диссертационной работе задач были использованы методы теории электрических линейных и нелинейных цепей, методы математического анализа, теория дифференциальных уравнений, современные программные продукты компьютерного моделирования и экспериментальные методы исследования.

Имитационное компьютерное моделирование предложенной силовой схемы было проведено в среде имитационного моделирования CASPOC. При расчете параметров входного каскада бортового ВП был применен математический пакет

MathCAD.

При проектировании разработанной силовой схемы преобразователей собственных нужд EVB51, ПСН110 У1, ПСН235 У2 была применена система трехмерного твердотельного компьютерного моделирования Autodesk Inventor.

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

1. Выработанные и обоснованные классификационные признаки и критерии сравнения силовых схем входных каскадов ВП, которые упорядочивают и сокращают время исследований всей совокупности существующих входных силовых схем за счет интегрального анализа типов, видов и подвидов рассматриваемых устройств.

2. Предложенные аналитические решения расчета статических и динамических потерь для силовых схем с различным количеством входных блоков и различными алгоритмами управления позволяют разрабатывать ВП с повышенным КПД.

3. Проведенный анализ влияния количества входных блоков, различных алгоритмов управления на качество входного потребляемого тока и параметры входного дросселя ВП позволяет улучшать его массогабаритные показатели.

4. Разработанные имитационные модели силовых схем с различным количеством входных блоков и различными алгоритмами управления, которые обеспечивают многоплановое исследование рабочих электромагнитных процессов и вычисление потерь для проектирования рассматриваемых ВП.

5. Исследованное влияние повышения класса по напряжению IGBT на изменение массогабаритных показателей, надежность и конструкцию ВП позволяет оптимизировать выбор силовых транзисторов.

**Практическая значимость диссертационной работы** заключается в следующем:

1. Разработанная классификация входной части ВП и предложенные критерии сравнения позволяют осуществить синтез построения входной части ВП с использованием силовых полупроводниковых приборов различных типов и с различными классами напряжения.

2. Разработанные оригинальные высоковольтные импульсные преобразователи, защищенные патентами RU 2750955 C1 и RU 2738956 C1, обеспечивают функционирование ВП от сети с напряжением, превышающим в несколько раз класс напряжения доступных IGBT приборов.

3. Полученные выражения для расчета параметров входного тока обеспечивают возможность с приемлемой точностью производить выбор частоты переключения силовых транзисторов и параметров входной индуктивности в зависимости от требуемого качества электрической энергии ВП с синхронным и асинхронными алгоритмами управления.

4. Проведенные научные исследования позволяют проводить анализ возможности модернизации ВП с учетом требуемой надежности и массогабаритных показателей при заданном классе IGBT приборов.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы при построении ВП не только на подвижном составе железных дорог, но и в таком

распространенном городском электрифицированном транспорте, как электробусы, трамваи, троллейбусы, метро.

Другой широкой областью применения полученных результатов являются бортовые ВП для летательных аппаратов или батискафов, которые имеют входное напряжение выше 1000 В.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы были использованы при разработке преобразователя собственных нужд EVB51 установленного на вагонах локомотивной тяги модели 61-4476 RIC (производства Siemens AG, г. Вена), что подтверждено Актом №1/20 о практическом использовании от 13.11.2020 г. Также результаты диссертационной работы были применены при разработке преобразователей собственных нужд типа ПСН110 У1 для электропоездов серии ЭП2Д (производство АО «ДМЗ», д. Демихово), типа ПСН100 У2 для пассажирских электровозов серии ЭП2К (производство АО «Коломенский завод», г. Коломна), типа ПСН235 У2 для грузовых электровозов серий 2(3)ЭС4К (производство ООО «ПК «НЭВЗ»», г. Новочеркасск) и типа Desiro Rus JVA5E37091108 для электропоездов серии «ЭГЭ» «Ласточка» (производство ООО «Уральские Локомотивы», г. Верхняя Пышма), что подтверждено Актом о практическом использовании №2/24 от 17.12.2024 г. Всего было выпущено более 2000 шт. высоковольтных ПСН.

Теоретические положения диссертационной работы в части исследования электрических процессов, проектирования компьютерных имитационных моделей, расчета статических и динамических потерь силовых полупроводниковых приборов были внедрены в учебный процесс в соответствии с учебно-методическими планами кафедры 310 «Энергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ, что подтверждено Актом №1/310 внедрения в учебный процесс Московского Авиационного института от 15.04.2025 г.

**Апробация работы.** Положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на 17 научно-технических конференциях.

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 26 научных работ, среди которых 10 – в изданиях, рекомендуемых Высшей Аттестационной Комиссией РФ, и 16 - в изданиях, индексируемых в базах Scopus, а также получено 3 патента РФ.

**Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.**

1. Классификационные признаки и критерии сравнения силовых схем входных каскадов ВП, используемых для получения повышенного качества входного тока.

2. Аналитические решения расчета статических и динамических потерь для силовых схем с различным количеством входных блоков и различными алгоритмами управления.

3. Анализ влияния количества входных блоков, различных алгоритмов управления на качество входного потребляемого тока и параметры входного дросселя ВП.

4. Имитационные модели силовых схем входных каскадов ВП с различным количеством входных блоков и различными алгоритмами управления.

5. Влияние повышения класса по напряжению IGBT на изменение массогабаритных показателей, надежность и конструкцию ВП.

6. Результаты компьютерных и экспериментальных исследований.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка работ, опубликованных по теме диссертации, списка используемых источников и приложений. Основная часть работы содержит 173 машинописных страницы, в том числе 66 рисунков и 11 таблиц. Список используемых источников включает 123 наименования.

## 2 ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели, поставлены задачи исследований, приведены методы исследований, определена научная новизна и практическая значимость, показана реализация результатов работы, а также дана общая характеристика работы.

**В первой главе** проведен анализ высоковольтных преобразователей с повышенным качеством потребления электрической энергии. Рассмотрены ПСН с входным однофазным напряжением, которые в общем виде имеют многоканальные выходные напряжения как переменного, так и постоянного тока.

Составлена обобщенная структурная схема ПСН (Рисунок 1), где A1.1-A1.M – последовательно соединенные входные блоки и соответствующие им однофазные инверторы A2.1-A2.M с выходными высокочастотными трансформаторами TV1.1-TV1.M и однофазными выпрямителями A3.1-A3.M; AU1.1-AU1.I1 и AU3.1-AU3.I3 – выходные однофазные и трехфазные инверторы; АК.1-АК.К – выходные конверторы; ZU1.1 - ZU1.I1 и ZU3.1-ZU3.I3 – однофазная и трехфазная нагрузка; ZK.1-ZK.K – нагрузка постоянного тока.

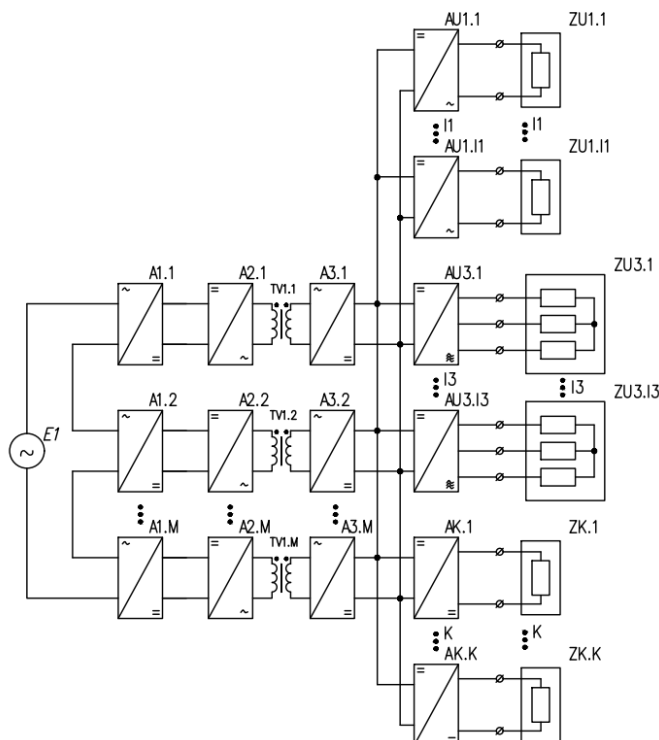


Рисунок 1 - Обобщенная структурная схема ПСН

Представленная обобщенная структурная схема охватывает всю совокупность реализации возможных схемотехнических решений и в зависимости от поставленной конкретной задачи за счет исключения тех или иных звеньев имеет возможность трансформироваться к простому рациональному виду. При этом каждое составляющее звено (кроме высокочастотного трансформатора) помимо непосредственного преобразования электрической энергии может выполнять функции регулирования и стабилизации выходного напряжения.

Необходимость выполнения принятых требований по качеству потребления электрической энергии определяет актуальность специальных исследований по разработке входных каскадов силовой схемы ПСН, которые в дальнейшем будем именовать как устройство коррекции входного тока (УКВТ).

Проведен анализ технической литературы, выделены три основных типа УКВТ: параллельные, вольтодобавочные, последовательные.

Рассмотрены различные электрические схемы и принцип работы УКВТ трех основных типов, наиболее часто используемых в современной технике. На основании выбранных критериев сделаны выводы о положительных и отрицательных сторонах каждой схемы УКВТ.

Определены и обоснованы классификационные признаки, по которым с учетом анализа технической литературы разработана классификация силовых схем (Рисунок 2).

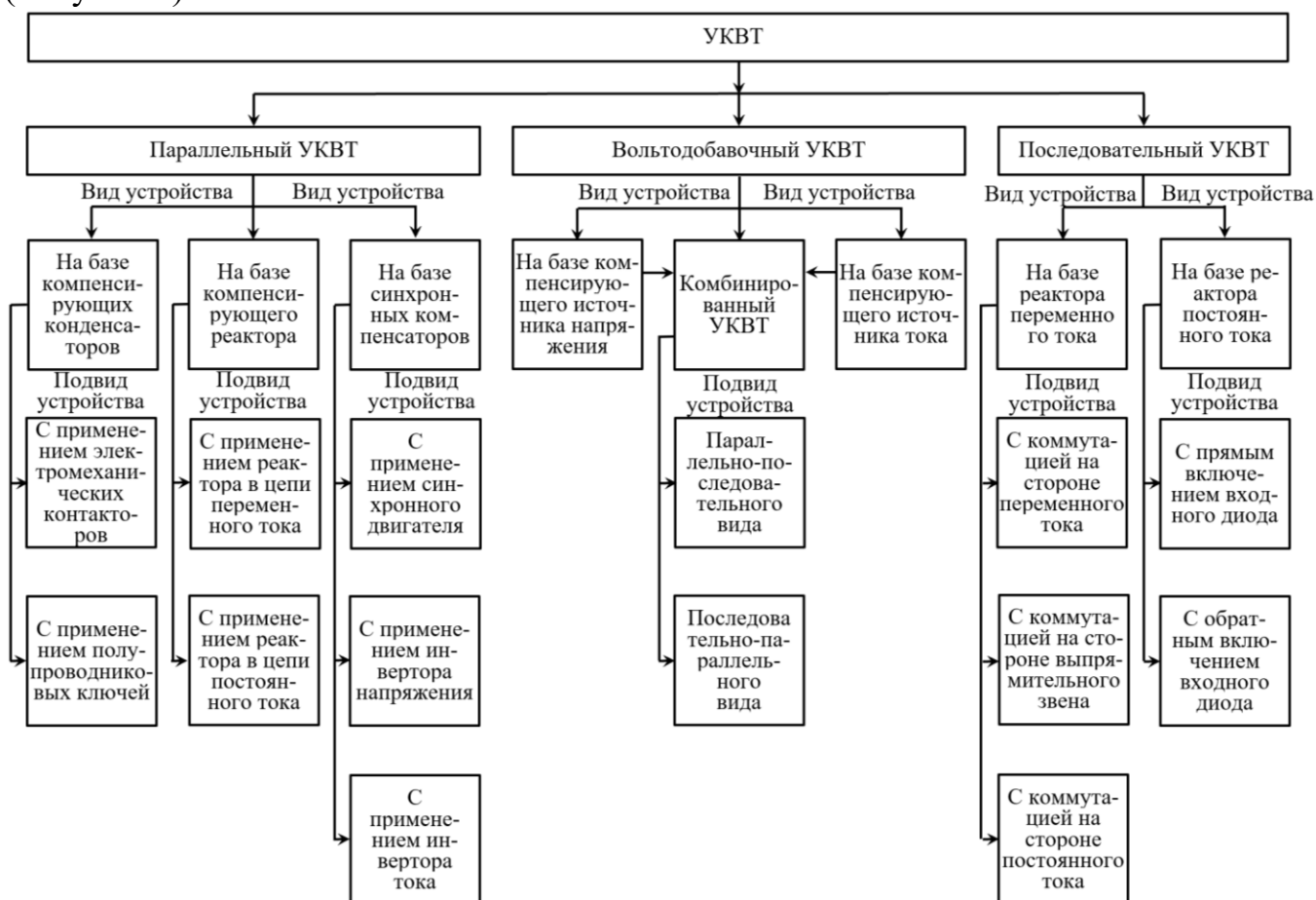


Рисунок 2 – Классификация силовых схем УКВТ

На основе проведенного анализа установлено, что применительно к высоковольтной области использования, во входных блоках входного каскада ВП преобразующего однофазный переменный и постоянный ток в постоянный с повышенным качеством потребления электрической энергии, работающим от сети переменного тока, предпочтительнее использовать силовые схемы последовательных УКВТ на базе переменного реактора с коммутацией на стороне постоянного тока.

Во входных блоках ВП, работающего от сети постоянного тока, также целесообразно применять выбранные силовые схемы УКВТ за счет совмещения функции повышения качества входного потребляемого тока и стабилизации выходного напряжения в промежуточном звене постоянного тока. В таком случае встроенные выпрямители не применяют.

**Во второй главе** рассмотрены рабочие процессы ВП в режиме повышения качества входного постоянного тока. Проведен выбор базисной схемы, представлены принципы работы, электромагнитные процессы, а также приведен расчет потерь в полупроводниковых элементах. С целью наглядности представления результатов и упрощения проведения сравнительного анализа, параметры силовых схем входных блоков рассматриваемых ВП приведены к базисной силовой схеме (Рисунок 3).

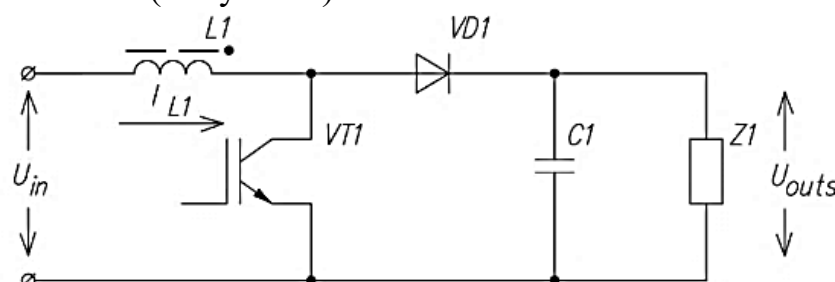


Рисунок 3 – Базисная силовая схема

Для базисной силовой схемы входного блока в качестве базисного значения допустимого напряжения на разомкнутых приборах принято 6500 В.

Кратко описан принцип работы базисной схемы, а также получены выражения для определения параметров входного тока базисной схемы. Определены зависимости амплитуды пульсаций тока входного реактора от входного напряжения, частоты коммутации и значения входной индуктивности; значение входного напряжения, при котором амплитуда пульсаций входного тока имеет максимальное значение. Выведено выражение для определения частоты коммутации транзистора в зависимости от заданной максимальной амплитуды пульсаций тока входного реактора. Получены выражения для определения мощности статических потерь в транзисторе базисной схемы, суммарной мощности динамических потерь в транзисторе и диоде базисной силовой схемы, статических потерь в диоде базисной схемы, а также для расчета суммарных потерь мощности в полупроводниковых приборах базисной силовой схемы в зависимости от мощности нагрузки, входного и выходного напряжений, частоты коммутации, КПД ВП и справочных характеристик используемого IGBT прибора и диода (1).

$$W_{SUM S(n=1)} = \frac{Q}{U_{in}\eta} [V_{CE(SAT)VT_{65}}(I_{in})\gamma + V_{FVD_{65}}(I_{in})(1-\gamma)] + \frac{f_c S(n=1) U_{outs}}{V_{CC VT_{65}}} (E_{on VT_{65}}(I_{in}, V_{CC VT_{65}}) + E_{off VT_{65}}(I_{in}, V_{CC VT_{65}}) + E_{off VD_{65}}(I_{in}, V_{CC VD_{65}})). \quad (1)$$

где  $Q$  – выходная мощность нагрузки силовой схемы;  $I_{in}$  – среднее значение входного тока силовой схемы;  $\eta$  – коэффициент полезного действия силовой схемы;  $V_{CE(SAT)VT_{65}}$  – значение падения напряжения на коллектор-эмиттере транзистора 65-го класса в замкнутом состоянии при протекании  $I_{in}$ ;  $E_{on VT_{65}}(I_{in}, V_{CC VT_{65}})$  и  $E_{off VT_{65}}(I_{in}, V_{CC VT_{65}})$  – справочные величины энергии потерь при переключениях транзистора;  $E_{off VD_{65}}(I_{in}, V_{CC VD_{65}})$  – справочная величина энергии потерь, которая выделяется при обратном восстановлении диода.

Аналогичные выражения получены для силовых схем с двумя, четырьмя (Рисунок 4 а) входными блоками, с синхронным (Рисунок 4 б) и асинхронным (Рисунок 4 в) алгоритмами управления.

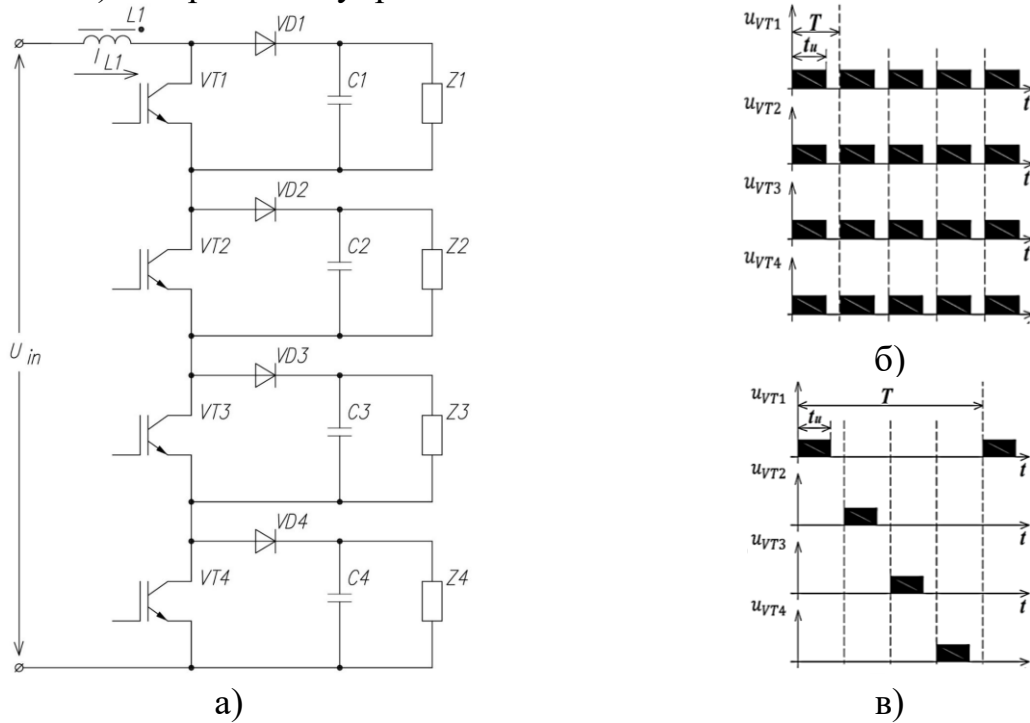


Рисунок 4 – а) Силовая схема с четырьмя последовательно соединенными входными блоками; б) синхронный алгоритм управления; в) асинхронный алгоритм управления

Для силовых схем с количеством входных блоков  $N$  и асинхронным алгоритмом управления определены значения входного напряжения, при которых амплитуда пульсаций входного тока имеет максимальные и нулевые значения. В обобщенном виде получены выражения для расчета максимального значения амплитуды пульсаций входного тока в силовых схемах с синхронным алгоритмом управления:

$$I_{m(max) L1 S(n=N)}(U_{in}) = \frac{1}{8} \frac{U_{outsum}}{f_c L1}, \quad (2)$$

и в силовых схемах с асинхронным алгоритмом управления:

$$I_{m(max) L1 A(n=N)}(U_{in}) = \frac{1}{8N^2} \cdot \frac{U_{outsum}}{f_c L1}. \quad (3)$$

Построены зависимости амплитуды пульсаций входного тока относительно параметров выбранной базисной силовой схемы (Рисунок 5), где кривая 1 соответствует силовым схемам, которые имеют  $N$  входных блоков и синхронный алгоритм управления; кривые 2 и 3 характеризуют силовую схему с асинхронным алгоритмом управления с двумя и четырьмя входными блоками соответственно.

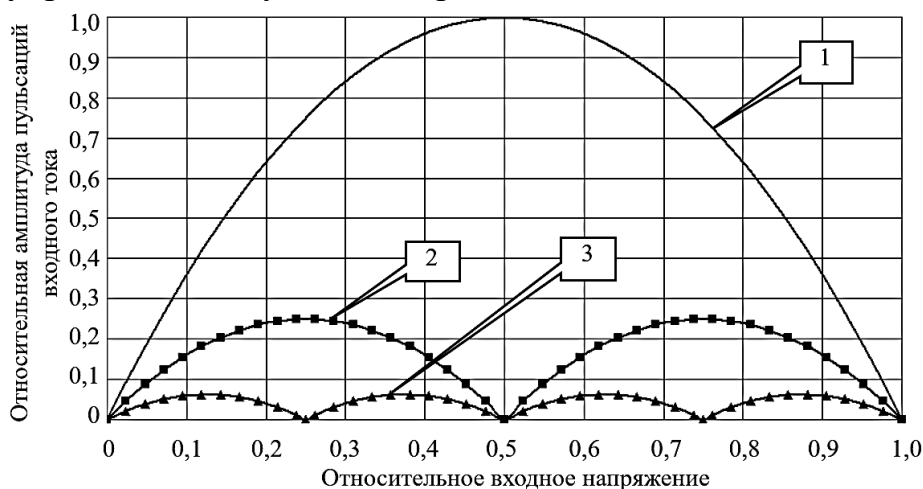


Рисунок 5 – Относительные амплитуды пульсации входного тока

Получены расчетные коэффициенты базисного приведения силовых схем: коэффициент амплитуды пульсаций для силовых схем с синхронным и асинхронным алгоритмом управления, которые имеют  $N$  входных блоков.

Получены выражения расчета коэффициента суммарной мощности статических (6) и динамических потерь (7) в транзисторах и коэффициент суммарной мощности статических потерь в диодах (8) для силовых схем, которые имеют  $N$  входных блоков:

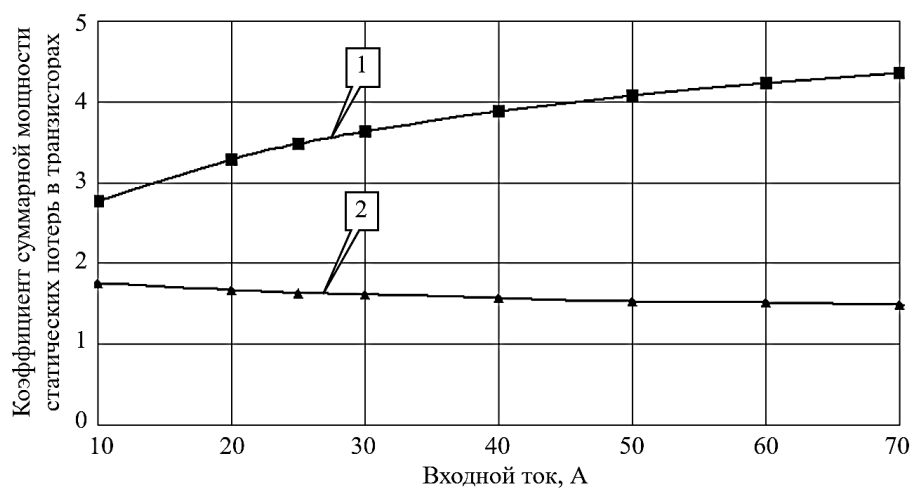
$$k_{S_{\Sigma} VTA(n=N)} = N \cdot \frac{V_{CE(SAT)} V_{T_N}(I_{in})}{V_{CE(SAT)} V_{T_{1_{65}}}(I_{in})}, \quad (6)$$

$$k_{P_{\Sigma} VT(n=N)} = \frac{V_{CC} V_{T_{65}} (E_{on VT_H}(I_{in}, V_{CC} V_{T_H}) + E_{off VT_H}(I_{in}, V_{CC} V_{T_H}) + E_{off VD_H}(I_{in}, V_{CC} V_{D_H}))}{N^2 V_{CC} V_{T_H} (E_{on VT_{65}}(I_{in}, V_{CC} V_{T_{65}}) + E_{off VT_{65}}(I_{in}, V_{CC} V_{T_{65}}) + E_{off VD_{65}}(I_{in}, V_{CC} V_{D_{65N}}))}, \quad (7)$$

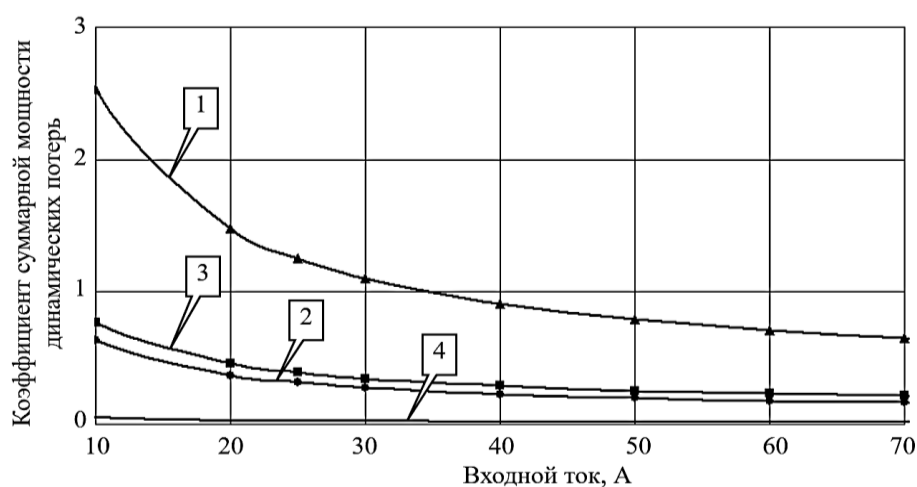
$$k_{S_{\Sigma} VD(n=N)} = k_{S_{\Sigma} VDA(n=N)} = N \frac{V_{FVD_H}(I_{in})}{V_{FVD_{65}}(I_{in})}. \quad (8)$$

где  $E_{on VT_H}(I_{in}, V_{CC} V_{T_H})$  и  $E_{off VT_H}(I_{in}, V_{CC} V_{T_H})$  – справочные величины энергии потерь при переключениях транзистора, имеющего  $N$  класс по напряжению;  $E_{off VD_H}(I_{in}, V_{CC} V_{D_H})$  – справочная величина энергии потерь, при обратном восстановлении диода, имеющего  $N$  класс по напряжению.

Посредством предложенных оценочных коэффициентов суммарных мощностей статических и динамических потерь было проведено исследование рассмотренных силовых схем с применением транзисторов и диодов ведущих производителей, справочные данные которых взяты из технической литературы. На рисунке 6 а представлены кривые коэффициентов суммарной мощности статических потерь в транзисторах, на рисунке 6 б представлены кривые суммарной мощности динамических потерь в транзисторах и диодах.



а)



б)

Рисунок 6 – Зависимости оценочных коэффициентов потерь

**В третьей главе** представлены рабочие процессы ВП в режиме повышения качества входного переменного тока.

Представлена базисная силовая схема переменного тока (Рисунок 7).

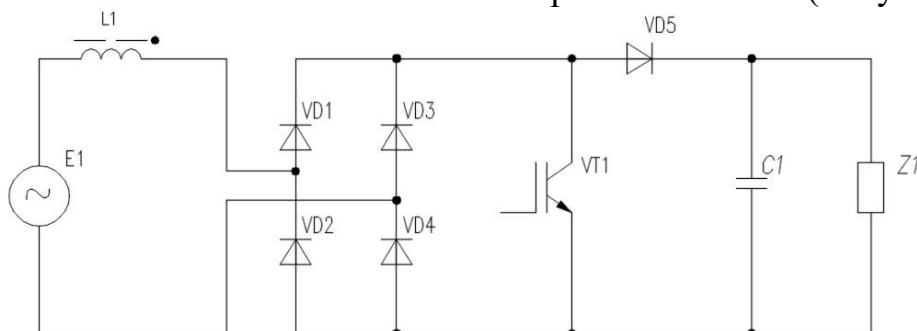


Рисунок 7 – Базисная силовая схема переменного тока

Рассмотрены ВП с одним входным блоком и разным количеством последовательно соединенных входных блоков с синхронным и асинхронным алгоритмами управления в режиме повышения качества входного переменного тока при работе от однофазной сети переменного тока. Получены выражения для обобщенного расчета функций входного тока и его огибающих, амплитуды высокочастотной составляющей входного тока, условия соблюдения режима

неразрывного тока, граничные частоты коммутации силовых транзисторов, которые соответствуют режиму непрерывного входного тока необходимой минимальной частоты коммутации силовых приборов в зависимости от выходной мощности, входного и выходного напряжений ВП с одним, двумя, четырьмя и разным большим количеством последовательно соединенных входных блоков с синхронным и асинхронным алгоритмами работы.

Для ВП с одним блоком огибающая функции быстроменяющейся составляющей определяется выражениями:

$$i_{\text{BX}+}(t) = \frac{1}{2f_c s(n=1)L_1} \left( 1 - \frac{|u_{\text{BX}}(t)|}{U_{\text{outs}}} \right); \quad (9)$$

$$i_{\text{BX}-}(t) = \frac{-1}{2f_c s(n=1)L_1} \left( 1 - \frac{|u_{\text{BX}}(t)|}{U_{\text{outs}}} \right). \quad (10)$$

выражение для огибающей функции полного входного тока:

$$i_{\text{BX} S(n=1)}^{\text{B}}(t) = I_{m \text{ BX}} \sin(\omega t) + \frac{U_{m \text{ BX}} \sin(\omega t)}{2f_c s(n=1)L_1} \left( 1 - \frac{U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} \right); \quad (11)$$

$$i_{\text{BX} S(n=1)}^{\text{H}}(t) = I_{m \text{ BX}} \sin(\omega t) - \frac{U_{m \text{ BX}} \sin(\omega t)}{2f_c s(n=1)L_1} \left( 1 - \frac{U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} \right). \quad (12)$$

На рисунке 8 представлены кривые входного тока и его огибающих ВП с одним входным блоком на интервале от 0 до T/4 сетевого напряжения при мощности нагрузки Q=100 кВт,  $f_c=1500$  Гц,  $U_{\text{BX}}=2100$  В,  $U_{\text{outs}}=4200$  В и  $L_1=10$  мГн сплошной линией - ток  $i_{\text{BX} b}(t)$ ; пунктирными линиями с кругами и квадратами - токи  $i_{\text{BX} S(n=1)}^{\text{B}}(t)$  и  $i_{\text{BX} S(n=1)}^{\text{H}}(t)$ ; сплошными линиями с кругами и квадратами – токи  $i_{\text{BX}+}(t)$  и  $i_{\text{BX}-}(t)$ .

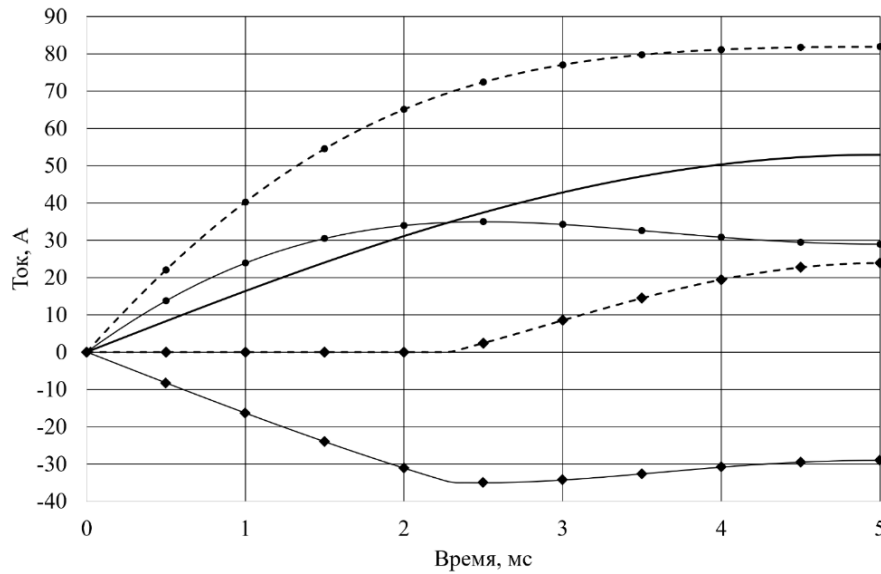


Рисунок 8 – Кривые входного тока и его огибающие ВП с одним входным блоком

Граничное значение частоты переключения силового транзистора, при котором поддерживается режим неразрывного входного тока:

$$\begin{aligned} f_{c s(n=1)} &> \frac{U_{m \text{ BX}}}{2I_{m \text{ BX}}L_1} \left( 1 - \frac{U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} \right) = \\ &= \frac{\eta U_{m \text{ BX}}^2}{4QL_1} \left( 1 - \frac{U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

Минимальная частота переключения транзистора входного блока, выше которой поддерживается режим непрерывного входного тока:

$$f_{min\ c\ S(n=1)} = \frac{\eta U_{m\ BX}^2}{4QL_1} \quad (14)$$

Для ВП с четырьмя входными блоками и асинхронным алгоритмом управления огибающие функции быстроменяющейся составляющей входного тока определяются для участка  $0 \leq \gamma < 0,25$ :

$$\begin{cases} i_{BX\ p+A(n=4)}(0 \leq \gamma < 0,25)(t) = \frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 7 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{|u_{BX}(t)|} \right) \\ i_{BX\ p-A(n=4)}(0 \leq \gamma < 0,25)(t) = -\frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 7 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{|u_{BX}(t)|} \right) \end{cases} \quad (15)$$

для участка  $0,25 \leq \gamma < 0,5$ :

$$\begin{cases} i_{BX\ p+A(n=4)}(0,25 \leq \gamma < 0,5)(t) = \frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 5 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{2|u_{BX}(t)|} \right) \\ i_{BX\ p-A(n=4)}(0,25 \leq \gamma < 0,5)(t) = -\frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 5 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{2|u_{BX}(t)|} \right) \end{cases} \quad (16)$$

для участка  $0,5 \leq \gamma < 0,75$ :

$$\begin{cases} i_{BX\ p+A(n=4)}(0,5 \leq \gamma < 0,75)(t) = \frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 3 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} - \frac{U_{outs}}{2|u_{BX}(t)|} \right) \\ i_{BX\ p-A(n=4)}(0,5 \leq \gamma < 0,75)(t) = -\frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 3 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} - \frac{U_{outs}}{2|u_{BX}(t)|} \right) \end{cases} \quad (17)$$

для участка  $0,75 \leq \gamma \leq 1$ :

$$\begin{cases} i_{BX\ p+A(n=4)}(0,75 \leq \gamma \leq 1)(t) = \frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 1 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} \right) \\ i_{BX\ p-A(n=4)}(0,75 \leq \gamma \leq 1)(t) = -\frac{u_{BX}(t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 1 - \frac{4|u_{BX}(t)|}{U_{outs}} \right) \end{cases} \quad (18)$$

где  $\gamma$  – коэффициент заполнения широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Получены выражения для расчета верхней и нижней огибающих функции полного входного тока на участке  $0 \leq \gamma < 0,25$ :

$$\begin{aligned} i_{BX\ A(n=4)}^B(0 \leq \gamma < 0,25)(t) = \\ = I_{m\ BX} \sin(\omega t) + \frac{U_{m\ BX} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 7 - \frac{4U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|} \right); \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} i_{BX\ A(n=4)}^H(0 \leq \gamma < 0,25)(t) = \\ = I_{m\ BX} \sin(\omega t) - \frac{U_{m\ BX} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 7 - \frac{4U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|} \right), \end{aligned} \quad (20)$$

на участке  $0,25 \leq \gamma < 0,5$ :

$$\begin{aligned} i_{BX\ A(n=4)}^B(0,25 \leq \gamma < 0,5)(t) = \\ = I_{m\ BX} \sin(\omega t) + \frac{U_{m\ BX} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 5 - \frac{4U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{2U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|} \right); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} i_{BX\ A(n=4)}^H(0,25 \leq \gamma < 0,5)(t) = \\ = I_{m\ BX} \sin(\omega t) - \frac{U_{m\ BX} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 5 - \frac{4U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{2U_{m\ BX} |\sin(\omega t)|} \right), \end{aligned} \quad (22)$$

на участке  $0,5 \leq \gamma < 0,75$ :

$$i_{\text{BX } A(n=4)}^{\text{B}}(0,5 \leq \gamma < 0,75)(t) = I_{m \text{ BX}} \sin(\omega t) + \frac{U_{m \text{ BX}} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \times \left( 3 - \frac{4U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} - \frac{U_{\text{outs}}}{2U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|} \right); \quad (23)$$

$$i_{\text{BX } A(n=4)}^{\text{H}}(0,5 \leq \gamma < 0,75)(t) = I_{m \text{ BX}} \sin(\omega t) - \frac{U_{m \text{ BX}} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \times \left( 3 - \frac{4U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} - \frac{U_{\text{outs}}}{2U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|} \right), \quad (24)$$

на участке  $0,75 \leq \gamma < 1$ :

$$i_{\text{BX } A(n=4)}^{\text{B}}(0,75 \leq \gamma < 1)(t) = I_{m \text{ BX}} \sin(\omega t) + \frac{U_{m \text{ BX}} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 1 - \frac{4U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} \right); \quad (25)$$

$$i_{\text{BX } A(n=4)}^{\text{H}}(0,75 \leq \gamma < 1)(t) = I_{m \text{ BX}} \sin(\omega t) - \frac{U_{m \text{ BX}} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \left( 1 - \frac{4U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} \right). \quad (26)$$

На рисунке 9 представлены на интервале от 0 до  $T/4$  сетевого напряжения при мощности нагрузки  $Q=100$  кВт,  $f_c=1500$  Гц,  $U_{\text{BX}}=2100$  В,  $U_{\text{outs}}=4200$  В и  $L_1=10$  мГн сплошной линией – ток  $i_{\text{BX } b}(t)$ ; пунктирными линиями с кругами и квадратами – токи  $i_{\text{BX } A(n=4)}^{\text{B}}(t)$ ,  $i_{\text{BX } A(n=4)}^{\text{H}}(t)$ ; сплошными линиями с кругами и квадратами – токи  $i_{\text{BX } p+A(n=4)}(t)$  и  $i_{\text{BX } p-A(n=4)}(t)$ .

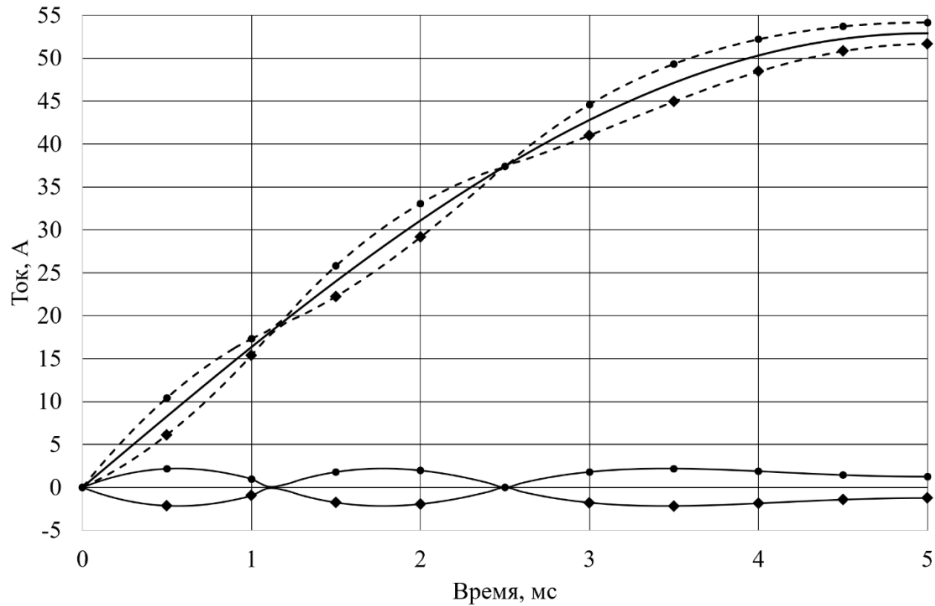


Рисунок 9 – Кривые входного тока и его огибающие ВП с четырьмя входными блоками и асинхронным алгоритмом управления

Найдены условия, при которых соблюдается режим неразрывного входного тока (т. е. функция нижней огибающей входного тока  $i_{\text{BX } A(n=4)}^{\text{H}}(t)$  имеет значения больше нуля) для участка  $0 \leq \gamma < 0,25$ :

$$I_{m \text{ BX}} \sin(\omega t) - \frac{U_{m \text{ BX}} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \cdot \left( 7 - \frac{4U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|}{U_{\text{outs}}} - \frac{3U_{\text{outs}}}{U_{m \text{ BX}} |\sin(\omega t)|} \right) > 0, \quad (27)$$

для участка  $0,25 \leq \gamma < 0,5$ :

$$I_{m\_BX} \sin(\omega t) - \frac{U_{m\_BX} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \cdot \left( 5 - \frac{4U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{2U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|} \right) > 0, \quad (28)$$

для участка  $0,5 \leq \gamma < 0,75$ :

$$I_{m\_BX} \sin(\omega t) - \frac{U_{m\_BX} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \cdot \left( 3 - \frac{4U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{U_{outs}}{2U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|} \right) > 0, \quad (29)$$

и для участка  $0,75 \leq \gamma \leq 1$ :

$$I_{m\_BX} \sin(\omega t) - \frac{U_{m\_BX} \sin(\omega t)}{8L_1 f_{cA(n=4)}} \cdot \left( 1 - \frac{4U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} \right) > 0. \quad (30)$$

Определены граничные частоты коммутации силовых транзисторов, которые соответствуют режиму непрерывного входного тока, для участка  $0 \leq \gamma < 0,25$ :

$$f_{cA(n=4)} > \frac{\eta U_{m\_BX}^2}{16QL_1} \left( 7 - \frac{4U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|} \right), \quad (31)$$

для участка  $0,25 \leq \gamma < 0,5$ :

$$f_{cA(n=4)} > \frac{\eta U_{m\_BX}^2}{16QL_1} \left( 5 - \frac{4U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{3U_{outs}}{2U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|} \right), \quad (32)$$

для участка  $0,5 \leq \gamma < 0,75$ :

$$f_{cA(n=4)} > \frac{\eta U_{m\_BX}^2}{16QL_1} \left( 3 - \frac{4U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} - \frac{U_{outs}}{2U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|} \right), \quad (33)$$

и для участка  $0,75 \leq \gamma \leq 1$ :

$$f_{cA(n=4)} > \frac{\eta U_{m\_BX}^2}{16QL_1} \left( 1 - \frac{4U_{m\_BX} |\sin(\omega t)|}{U_{outs}} \right). \quad (34)$$

где  $\eta$  – коэффициент полезного действия ВП.

Определена минимальная частота коммутации транзисторов входных блоков, выше которой поддерживается режим непрерывного входного тока:

$$f_{min\ cA(n=4)} = \frac{\eta U_{m\_BX}^2}{16QL_1} \quad (35)$$

Для силовой схемы, которая содержит  $N$  входных блоков, минимальная частота коммутации транзисторов, выше которой поддерживается режим непрерывного входного тока, определяется как:

$$f_{min\ c} = \frac{\eta U_{m\_BX}^2}{4NQL_1} \quad (36)$$

Получены выражения расчета мощности статических и динамических потерь в силовых полупроводниковых приборах ВП с одним, двумя, четырьмя и разным большим количеством последовательно соединенных входных блоков с синхронным и асинхронным алгоритмами управления в режиме повышения качества входного переменного тока при работе от однофазной сети переменного тока в зависимости от частоты коммутации, выходной мощности, входного и выходного напряжения ВП с использованием коэффициентов линеаризации вольт-

амперной характеристики и динамических потерь для IGBT приборов разных классов по напряжению.

**В четвертой главе** представлен анализ применения IGBT приборов различных классов в преобразователях собственных нужд с целью повышения надежности работы преобразователя собственных нужд электровозов серии 2(3)ЭС4К ПСН235 У2 в условиях наличия ненормированных перенапряжений в контактной сети. Рассмотрена возможность повышения класса IGBT транзисторов входных каскадов ПСН, уже находящихся в эксплуатации.

Приведено описание входной схемы преобразователей собственных нужд. Представлено описание работы силовой части и осциллограммы электромагнитных процессов.

Проведен расчет потерь с использованием методов, разработанных в диссертации, в силовых приборах входных модулей преобразователя при использовании штатных приборов и альтернативных приборов более высокого класса различных производителей.

На рисунке 10 представлены полученные зависимости (сплошные линии) мощности потерь в IGBT-приборах 65-го класса от частоты коммутации IGBT-приборов. Одновременно на этих рисунках штриховой линией (расчетные значения) показаны мощности потерь в IGBT-приборах 17-го класса при одной используемой частоте коммутации 1500 Гц во входных блоках и одной используемой частоте коммутации 13 500 Гц в полумостовом резонансном инверторе входной части применяемого прототипа ВП.

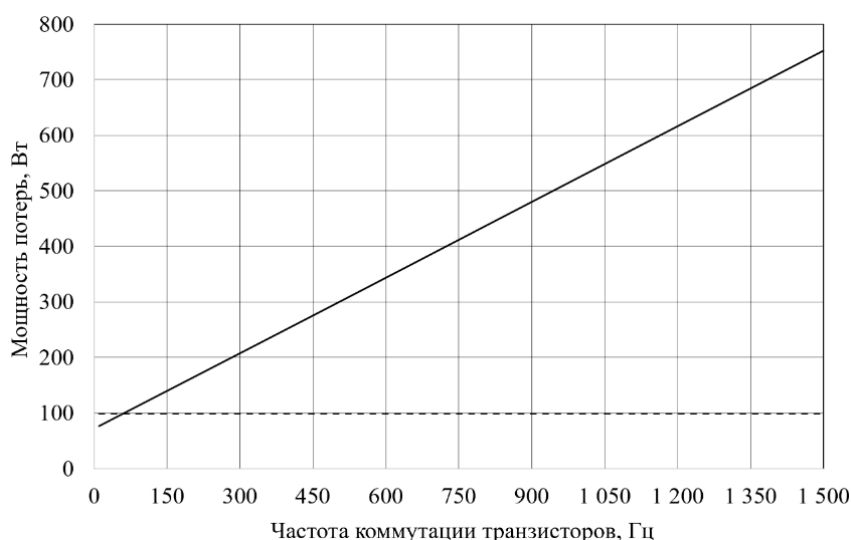


Рисунок 10 – Мощность потерь в транзисторах входного блока

Сделаны выводы о необходимых изменениях в конструкции преобразователя и системе управления в случае использования альтернативных приборов более высокого класса с учетом допустимых потерь и соблюдении условия равенства нагрева кристаллов силовых полупроводниковых ключей.

Проведен анализ изменения массогабаритных показателей моточных изделий и всего преобразователя в целом в случае использования альтернативных приборов более высокого класса.

Проведена оценка показателей надежности преобразователя в случае применения альтернативных приборов более высокого класса.

Сделаны выводы об улучшении надежности и одновременно об ухудшении массогабаритных показателей преобразователя в случае замены штатных полупроводниковых приборов на альтернативные полупроводниковые приборы более высокого класса. При одних и тех же частотах переключения транзисторов, из-за худших динамических свойств, мощность потерь в современных IGBT приборах 65-класса полумостовых резонансных инверторов ВП более чем в 12 раз превышает значения мощности потерь в IGBT приборах 17-го класса. Проведенные исследования показали, что современные IGBT приборы 17-го класса являются наиболее предпочтительными для применения в рассматриваемых ВП.

**В пятой главе приведены** результаты компьютерного моделирования и экспериментальных исследований.

Для подтверждения аналитических результатов диссертации проводилось компьютерное моделирование с помощью программы моделирования устройств силовой электроники CASPOC.

Проведена апробация теоретических законов, полученных в главах 2 и 3 на преобразователе собственных нужд EVB51 для вагонов РИЦ (Рисунок 11).

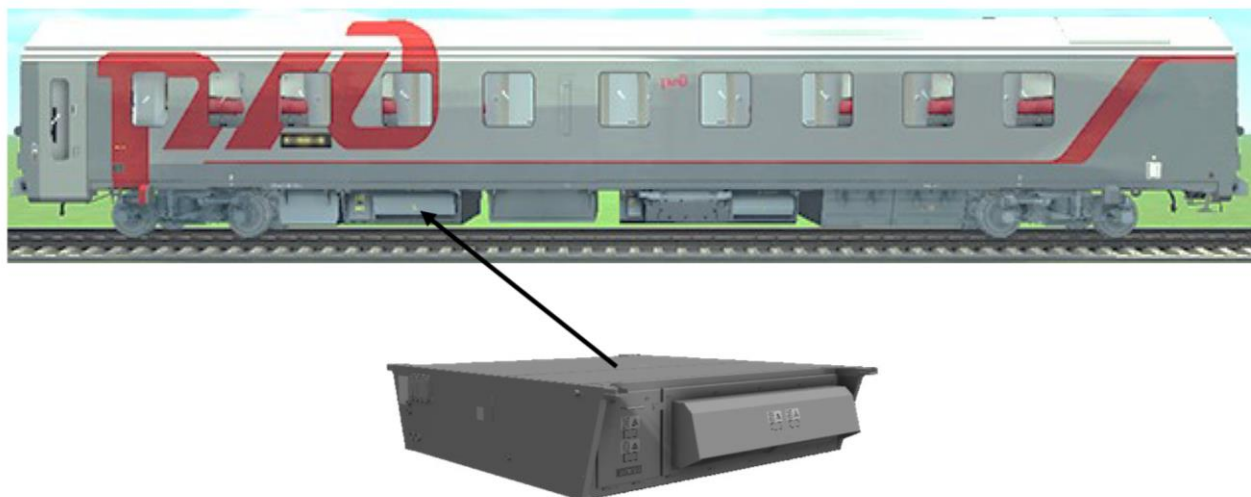


Рисунок 11 – EVB и место установки под спальным вагоном

Приведено сравнение полученных результатов расчета по выражениям, полученным в диссертации, результатов моделирования и значений, полученных при измерении в схеме преобразователя EVB51 для различных режимов работы преобразователя.

В частности, были исследованы зависимости амплитуды и частоты пульсаций входного тока EVB от входного напряжения на уровне от 1100 до 4000 В при выходной суммарной мощности 50, 75, 100 кВА. На рисунке 12 приведена осциллограмма кривой пульсаций входного тока EVB при последовательном соединении четырех входных блоков с асинхронным алгоритмом управления. Указанная осциллограмма была получена при входном напряжении 4000 В постоянного тока и выходной суммарной мощности 50 кВА.

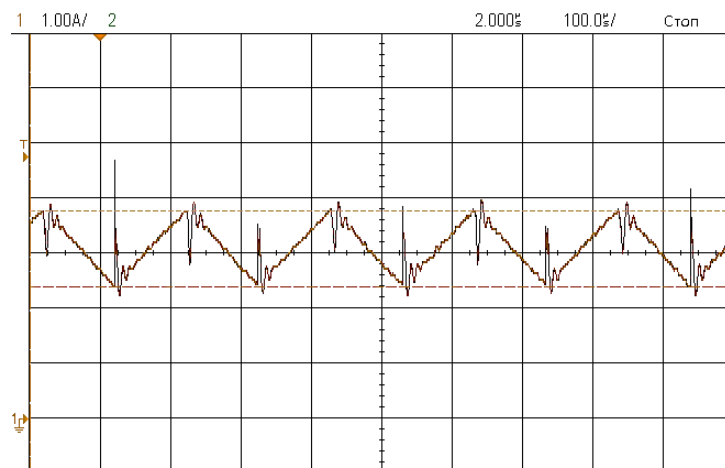


Рисунок 12 – Осциллограмма пульсаций входного тока EVB при входном напряжении 4000 В и выходной мощности 50 кВА. Масштаб по горизонтали: время 100 мкс в клетке; масштаб по вертикали: 1 А в клетке

На рисунке 13 представлены результаты вычислений и измерений амплитуды пульсаций входного тока преобразователя с четырьмя входными блоками и асинхронным алгоритмом управления в диапазоне входного напряжения постоянного тока от 2200 до 4100 В, где сплошной линией показаны результаты вычислений амплитуды пульсаций входного тока по выражениям, полученным в главах 2 и 3, пунктирной линией показаны измеренные значения.

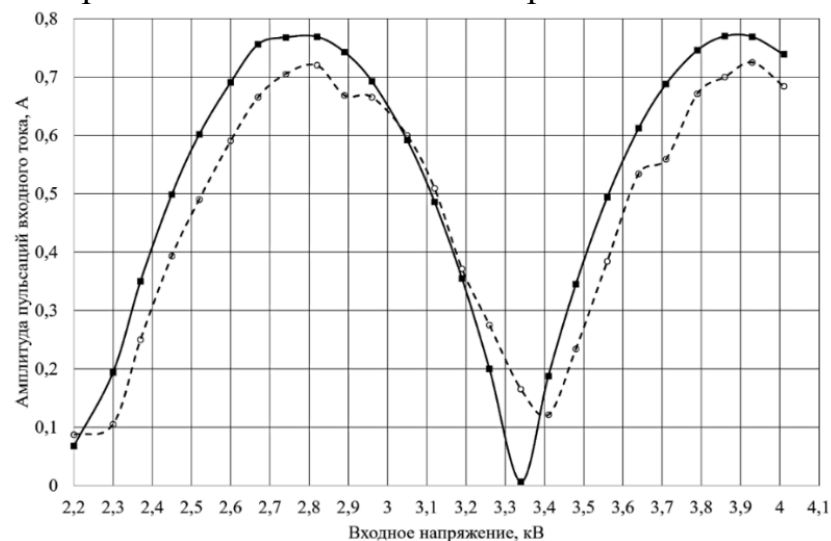


Рисунок 13 – Результаты вычислений и измерений амплитуды пульсаций входного тока преобразователя с четырьмя входными блоками и асинхронным алгоритмом управления

Приведены результаты исследования зависимости мощности динамических и статических потерь в IGBT приборах входных блоков преобразователя EVB51 от входного напряжения и выходной суммарной мощности. Приведены осциллограммы тока и напряжения, полученные в случае размыкания и замыкания транзистора IGBT прибора, в преобразователе EVB51 с четырьмя входными блоками и асинхронном алгоритме управления транзисторами. На рисунке 14 представлена осциллограмма транзистора входного блока EVB при размыкании транзистора.

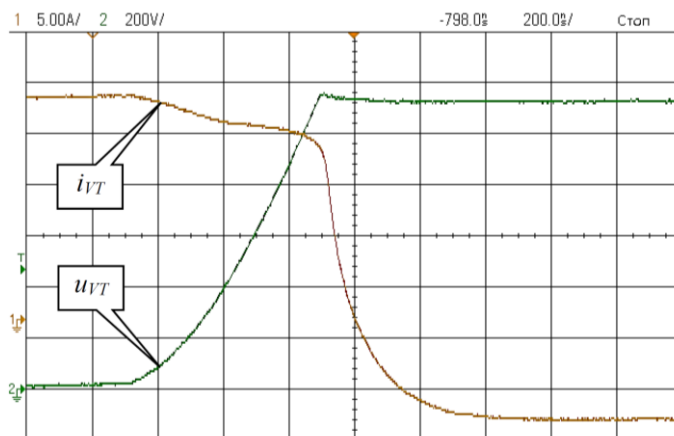


Рисунок 14 – Осциллограммы тока и напряжения транзистора входного блока EVB при размыкании транзистора. Масштаб по горизонтали: время 200 нс в клетке; масштаб по вертикали: 5 А в клетке

По полученным из осциллограмм массивам цифровых данных значений токов и напряжений с помощью программы Mathcad и с учетом полученных в диссертационной работе выражений рассчитывались мощности динамических потерь при замыкании и размыкании IGBT приборов. Аналогичным образом определялись мощности статических потерь в транзисторах и диодах, а затем после суммирования находилась общая мощность потерь в полупроводниковых приборах входных блоков преобразователя EVB51 (Рисунок 15).



Рисунок 15 – Результаты исследования суммарной мощности потерь в IGBT приборах входных блоков

Также были проведены исследования зависимости коэффициента искажений нелинейности входного тока EVB от входного напряжения переменного тока и выходной суммарной мощности ВП. В качестве примеров на рисунке 16 представлены зависимости коэффициента искажений нелинейности входного тока EVB с четырьмя входными блоками и асинхронным алгоритмом управления от выходной мощности при входном напряжении на уровне 2200 и 2800 В переменного тока, которые были вычислены по предложенным аналитическим выражениям (сплошная линия), рассчитаны с помощью разработанных ИМ (пунктирная линия) и получены в ходе экспериментальных исследований (обозначены квадратами).

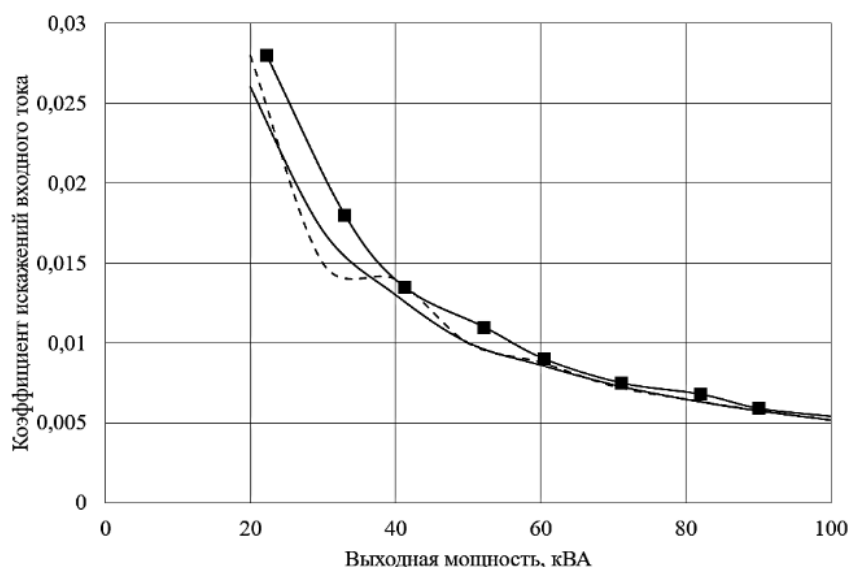


Рисунок 16 – Результаты исследования коэффициента искажений нелинейности входного тока при входном напряжении 2200 В

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационной работы «Входные каскады высоковольтного преобразователя для бортовых электротехнических комплексов» можно сделать следующее заключение:

1. Разработанная на базе проведенного анализа технической литературы классификация позволяет упорядочить и сократить время исследований всей совокупности существующих входных силовых схем высоковольтного преобразователя за счет интегрального анализа типов, видов и подвидов рассматриваемых устройств.

2. Предложенные критерии сравнения обеспечивают выявление предпочтительного типа силовой схемы входного каскада высоковольтного преобразователя при заданных требованиях по применению.

3. Максимальная амплитуда пульсаций входного тока не зависит от количества входных блоков высоковольтного преобразователя при синхронном управлении.

4. При равных условиях силовые схемы, которые имеют  $N$  входных блоков, с асинхронным алгоритмом управления имеют в  $N^2$  раз меньше максимальную амплитуду пульсаций входного тока по сравнению с силовыми схемами с синхронным алгоритмом управления.

5. Силовые схемы с одинаковым количеством входных блоков независимо от алгоритма управления имеют одинаковую суммарную мощность статических потерь как в транзисторах, так и в диодах.

6. Суммарная мощность статических потерь в транзисторах и диодах силовых схем всегда превышает суммарную мощность статических потерь в соответствующих полупроводниковых приборах силовой схемы с меньшим количеством входных блоков.

7. Суммарная мощность динамических потерь в транзисторах и диодах при асинхронном алгоритме управления значительно ниже суммарной мощности

динамических потерь, чем при использовании синхронного алгоритма управления при условии равенства пульсаций входного тока.

8. При синхронном и асинхронном алгоритмах управления транзисторами амплитуда пульсаций входного тока не зависит от выходной мощности высоковольтного преобразователя.

9. При асинхронном алгоритме управления транзисторами применение двух входных блоков в высоковольтном преобразователе позволяет добиться максимум 4,5-кратного и минимум 2-кратного улучшения амплитуды пульсаций входного тока, а применение четырех входных блоков позволяет добиться максимум 14-кратного и минимум 4,2-кратного улучшения амплитуды пульсаций входного тока по сравнению с одним входным блоком.

10. Для поддержания режима непрерывного входного тока предлагается повышать частоту коммутации транзисторов с учетом граничных условий.

11. С повышением количества входных блоков мощности статических и динамических потерь повышаются.

12. Благодаря лучшим динамическим свойствам современных IGBT приборов 17-го класса входные блоки и полумостовые резонансные инверторы рассматриваемых высоковольтных преобразователей имеют полную мощность потерь в силовых полупроводниковых ключах в 2,55 раз меньше, чем в высоковольтных преобразователях, которые используют IGBT приборы 25-го класса.

13. При одних и тех же частотах переключения транзисторов из-за худших динамических свойств мощность потерь в современных IGBT приборах 65-класса полумостовых резонансных инверторов высоковольтных преобразователей более чем в 12 раз превышает значения мощности потерь в IGBT приборах 17-го класса.

14. Проведенные исследования показали, что современные IGBT приборы 17-го класса являются наиболее предпочтительными для применения в рассматриваемых высоковольтных преобразователях.

15. Наибольшая разница между результатами, полученными в ходе аналитических расчетов и компьютерного моделирования, выявлена при определении потерь мощности в IGBT приборах входных блоков. При этом она не превышает 1,7 % и связана с неточностью линеаризации вольтамперной характеристики транзисторов и диодов, выбранных IGBT приборов.

16. Максимальная разность между аналитическими и экспериментальными результатами не превышает 7,9 %, выявлена при определении коэффициента искажений нелинейности входного тока высоковольтного преобразователя. Она объясняется наличием погрешности измерительных приборов, неточностью линеаризации вольтамперной характеристики транзисторов и диодов, а также погрешностью, вносимой системой управления EVB51.

17. В целом, результаты компьютерных и экспериментальных исследований подтвердили правильность и достоверность выведенных выражений и выводов, полученных в диссертационной работе.

**СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**  
**Публикации в изданиях по перечню ВАК Министерства науки и высшего образования РФ**

1. **Скореход Ю. Ю.** Анализ влияния синхронного и асинхронного способа управления на качество потребляемого тока преобразователя/ Интеллектуальная электротехника, №1, 2025 – с. 81-92.

2. **Скореход Ю. Ю.** Потери мощности в силовых ключах входных блоков высоковольтного преобразователя/ Практическая силовая электроника, №4 (96), 2024 – с. 12-19.

3. **Скореход Ю. Ю.,** Вольский С. И. Анализ бортовых высоковольтных преобразователей однофазного переменного тока с повышенным коэффициентом мощности/ Электричество, №10, 2020 – с. 44–51. Личный вклад автора заключается в разработке классификации силовых схем устройства коррекции входного тока и составлении обобщенной структурной схемы бортового высоковольтного преобразователя однофазного тока.

4. **Skorokhod Y.,** Volskiy S., Echkilev N. Selecting the switching frequency of the 6500V IGBT High Voltage DC Converter/ Электричество №8, 2021 – с. 21-27. Личный вклад автора заключается в разработке математических выражений для расчета потерь мощности в силовых полупроводниковых приборах и получении алгоритма выбора частоты переключения IGBT.

5. **Скореход Ю. Ю.,** Вольский С. И., Сорокин Д. А. Применение IGBT и SiC MOSFET приборов в преобразователе постоянного в двухполярный постоянный ток/ Практическая силовая электроника, №3(87), 2022 – с. 9–14. Личный вклад автора заключается в разработке компьютерной модели и в проведении сравнительного анализа при использовании IGBT и SiC MOSFET приборов.

6. Вольский С. И., **Скореход Ю. Ю.,** Синявский И. В., Стрельцов А. И. Преобразователь собственных нужд ПСН110 У1 для электропоезда ЭП2Д/ Вестник Всероссийского научно-исследовательского и проектно-конструкторского института электровозостроения, №1 (75), 2017 – с. 12-21. Личный вклад автора заключается в разработке принципа работы и в расчете параметров преобразователя ПСН110 У1.

7. **Скореход Ю. Ю.,** Петрашевская И. А., Вольский С. И. Моделирование системы электроснабжения постоянного тока газо- и нефтепроводов с высоковольтными преобразователями/ М.: Известия высших учебных заведений. Электромеханика, №3, 2011 – с. 76–78. Личный вклад автора заключается в компьютерном моделировании системы электроснабжения и определении основных параметров.

8. **Скореход Ю. Ю.,** Вольский С. И. Расчет индуктивности дросселя входного фильтра/ Электроника и электрооборудование транспорта, №1, 2021 г. – с. 2-5. Личный вклад автора заключается в разработке математического описания и в определении зависимостей амплитуд пульсаций тока входного дросселя преобразователя при работе с различными алгоритмами управления.

9. **Скореход Ю. Ю.,** Вольский С. И., Сорокин Д. А., Сухов Д. В., Анализ технических характеристик «быстрых» силовых диодов альтернативных производителей/ Практическая силовая электроника, №2(90), 2023 г. – с. 13-18.

Личный вклад автора заключается в разработке испытательной установки для проверки характеристик диодов и проведении сравнительного анализа характеристик «быстрых» диодов после проведенных испытаний.

10. **Скореход Ю. Ю.**, Вольский С. И., Корнев А. С., Викулов И. П., Имитатор импульсных высоковольтных перенапряжений, *Электричество* №11, 2021 г. – с. 18-27. Личный вклад автора заключается в разработке силовой схемы имитатора, и в проведении экспериментальных исследований.

#### **Публикации в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus**

1. **Skorokhod Y.**, Sorokin D., Volskiy S. Analysis of the influence of error amplifier factors on total harmonic distortion of converter input current/ Proc. in the 8th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE-2021), Ankara, 2021 – pp. 174–179. Личный вклад автора заключается в разработке математических выражений для расчета параметров силовой части схемы, в анализе и в представлении результатов исследований на конференции.

2. **Skorokhod Y.**, Volskiy S. Analysis of high-voltage converters with serial connection units and with input current correction/ Proc. In 21<sup>st</sup> International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE2020), Prague, 2020 – pp. 133–137. Личный вклад автора заключается в разработке силовой схемы высоковольтного преобразователя и в исследовании зависимостей амплитуды пульсаций входного тока от количества входных блоков, работающих на постоянном токе.

3. **Skorokhod Y.**, Volskiy S., Sorokin D. High-voltage converter for the traction application/ *Advances in Power Electronics*, vol 2016, Article ID 4705709. Личный вклад автора заключается в получении математического описания высоковольтного тягового преобразователя.

4. **Skorokhod Y.**, Sorokin D., Volskiy S. Study of Power Circuit Parameters of Three-Phase Grid-Tie Inverter/ Proc. in International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2025. – pp. 362-366. Личный вклад автора заключается в анализе влияния параметров рассматриваемого инвертора на электромагнитные процессы и в проведении экспериментальных исследований.

5. **Skorokhod Y.**, Sorokin D., Volskiy S. Power Converter with a Galvanic Isolation and an Increased Efficiency/ Proc in International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Shenzhen, China, 2024. – pp. 500-505. Личный вклад автора заключается в разработке силовой схемы и математического описания для расчета электромагнитных процессов в рассматриваемом преобразователе и в представлении результатов исследований на конференции.

6. Sorokin D., **Skorokhod Y.**, Volskiy S. Universal mathematical model of single-phase DC-DC bridge converter for different control algorithms/ Proc/ in International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Shanghai, China, 2023. – pp. 147-152. Личный вклад автора заключается в разработке силовой схемы и математической модели однофазного мостового преобразователя, представлении результатов исследований на конференции.

7. **Skorokhod Y.**, Sorokin D., Volskiy S. Development of the control system for three-phase power factor corrector/ Proc. in International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion (PCIM2019), Nurnberg, 2019 – p. 1813–1819. Личный вклад автора заключается в разработке алгоритма управления и математического описания системы управления трехфазного корректора, представлении результатов на конференции.

8. **Skorokhod Y. Y.**, Sorokin D. A., Volskiy S. I. Power factor corrector for bipolar unbalanced load and asymmetrical three-phase power supply/ Proc. in International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion (PCIM2020), Nurnberg 2020 – pp. 1079–1085. Личный вклад автора заключается в разработке алгоритма управления и математического описания системы управления трехфазного корректора мощности при несимметричной нагрузке.

9. **Skorokhod Y.**, Volskiy S. The analysis and simulation of power circuits for AC high voltage converter/ Proc. in International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Bangkok, Thailand, 2007 – pp. 1741–1747. Личный вклад автора заключается в разработке компьютерной модели силовой схемы и в исследовании электромагнитных процессов в силовой схеме рассматриваемого высоковольтного преобразователя переменного тока и представлении результатов на конференции.

10. Volskiy S. I., **Skorokhod Y. Y.** and Shergin V.V. The analysis and simulation of power circuits for high voltage converter/ Proc. CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, China, 2006 – pp. 1–5. Личный вклад автора заключается в разработке математической и компьютерной моделей высоковольтного преобразователя и в представлении результатов на конференции.

11. **Skorokhod Y. Y.** and Volskiy S. I. Development and test of the power multilevel converter for wind turbine systems/ Proc. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 2008 – pp. 804–809. Личный вклад автора заключается в разработке силовой схемы многоуровневого преобразователя, проведении экспериментальных исследований, представлении результатов на конференции.

12. **Skorokhod Y.**, Volsky S., Antushev N. and Volskiy N. Power supply source for the continental shelf bottom exploration system/ Proc. PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, 2014 – pp. 1–8. Личный вклад автора заключается в анализе и разработке силовых схем источника питания, математических выражений для вычисления потерь и в представлении результатов на конференции.

13. **Skorokhod Y. Y.**, Sorokin D. A., Volskiy S. I. Three-phase power factor corrector with direct power control and power supply of the unbalanced industrial network/ Proc. in E3S Web of Conferences, International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), Vol. 124 (2019), Published online: 10 February 2020, DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912405017>. Личный вклад автора заключается в исследовании электромагнитных процессов посредством разработанных автором математических и имитационных моделей, в проведении экспериментальных исследований.

14. **Skorokhod Y.**, Volskiy S., Sorokin D. High Voltage Converter Input Units with Improved Input Current Quality/ Proc in PCIM Asia Shanghai Conference 2025; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Shanghai, China, 2025. – pp. 212-217. Личный вклад автора заключается в разработке силовой схемы, математического описания для расчета электромагнитных процессов в рассматриваемом преобразователе, построении алгоритмов управления и в представлении результатов исследований на конференции.

15. **Skorokhod Y.**, Sorokin D., Volskiy S. Parameter Selection Algorithm for a High-Voltage Converter Protection Unit/ Proc. in 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2026. – pp. 331-335. Личный вклад автора заключается в определении алгоритма управления силовым ключом и в проведении экспериментальных исследований.

16. **Skorokhod Y.**, Sorokin D., Volskiy S. Evaluation of the Weight and Volume Parameters of a Single-Phase Electronic Transformer/ Proc. in 2026 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2026. – pp. 336-341. Личный вклад автора заключается в определении алгоритма переключения силовых ключей рассматриваемого преобразователя и в проведении экспериментальных исследований.

### **Доклады на конференциях**

International Conference on Power Electronics and Drive Systems (г. Бангкок, 2007 г.), IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference (г. Шанхай, 2006 г.), IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, (г. Сингапур, 2008 г.), PCIM Europe 2014 (г. Нюрнберг, 2014 г.), International Scientific and Technical Conference Smart Energy Systems 2019 (SES-2019), PCIM2019 (г. Нюрнберг, 2019 г.), PCIM2020 (г. Нюрнберг, 2020 г.), 8th International Conference ICEEE-2021 (г. Анталия, 2021 г.), International Conference ICOECS-2021 (г. Уфа, 2021 г.), 9th International Conference ICEEE-2022 (г. Алания, 2022 г.), 14th Seminar SEPOC-2022 (г. Санта Мария, 2022 г.), PCIM Asia 2023 (г. Шанхай, 2023 г.), International Ural Conference UralCon-2023 (г. Магнитогорск, 2023 г.), PCIM Asia 2024 (г. Женьчжень, 2024 г.), International Conference ICIEAM – 2024, ICIEAM – 2025 (г. Сочи, 2024, 2025 гг.), PCIM Asia 2025 (г. Шанхай, 2025 г.), ICIEAM – 2026 (г. Сочи, 2026 г.), PCIM Asia 2026 (г. Женьчжень, 2026 г.).

### **Патенты**

1. Дякин С. В., **Скорород Ю. Ю.**, Вольский С. И., Сорокин Д. А. Преобразователь электрической энергии/ Патент на полезную модель, RU166998 U1, 20.12.2016.

2. **Скорород Ю. Ю.**, Вольский С. И. Преобразователь собственных нужд с коррекцией входного тока/ Патент на изобретение №2 738 956. Бюл. №36 от 21.12.2020 г.

3. **Скорород Ю. Ю.**, Вольский С. И. Преобразователь собственных нужд/ Патент на изобретение №2750955. Бюл. №19 от 06.07.2021 г.