

На правах рукописи
УДК 621.314



Дякин Сергей Валерьевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ С СОЛНЕЧНЫМИ
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена на кафедре «Электроэнергетические, электромеханические и биотехнические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ.

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

Официальные оппоненты: **Гречишников Виктор Александрович**,
доктор технических наук, профессор, доцент,
профессор кафедры «Электроэнергетика
транспорта», первый заместитель директора –
начальник учебного отдела Института транспортной
техники и систем управления ФГБОУ ВО
«Московский государственный университет путей
сообщения Императора Николая II».
Коняхин Сергей Федорович,
кандидат технических наук, главный конструктор по
направлению «Преобразовательная техника»
АО«Аэроэлектромаш».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский университет
«МЭИ».

Защита диссертации состоится «28» декабря 2016 г. в 14 часов 00 мин. на
заседании диссертационного совета Д212.125.07 при Федеральном
государственном бюджетном образовательном учреждении высшего
образования «Московский авиационный институт (национальный
исследовательский университет)» МАИ по адресу: 125993, г. Москва,
Волоколамское шоссе, д.4, корп. «Г», ауд. 302 (кафедра 310).

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

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим
направлять по адресу: РФ, 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4 на имя
ученого секретаря диссертационного совета Д212.125.07; e-mail:
stevilen@mail.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д212.125.07



В.С. Степанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последнее десятилетие наблюдается неуклонный рост доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в общей доле мировой энергетики, что связано с необходимостью снизить влияние человека на окружающую среду, обусловленное вредными выбросами при сжигании углеводородов, а также в рамках формирования будущей мировой энергетики возникает потребность в расширении использования источников энергии альтернативным углеводородам.

Одним из таких ВИЭ является солнечная энергия. Преобразование солнечной энергии осуществляется с использованием солнечных фотоэлектрических установок (СФУ), состоящих из солнечных батарей (СБ), статических преобразователей (СП) и накопителей энергии (НЭ). В свою очередь, СП с использованием инвертора на основе современных полупроводниковых устройств осуществляет преобразование напряжения постоянного тока в требуемое напряжение переменного тока и синхронизацию его с сетью переменного тока, в случае подключения к ней СФУ.

В настоящее время СФУ находят самое широкое применение при создании энергетических установок в труднодоступных районах России, условиях ограниченных значений генерируемой мощности, включая космические аппараты (КА), а также в качестве дополнительного источника энергии.

Вопросам повышения эффективности работы СБ и СП посвящены научные работы таких ученых, как Ж.И. Алферов, В.С. Моин, Г.С. Зиновьев, Ю.К. Розанов, С.Б. Резников, О.И. Хасаев, Ю.И. Конев, И.А. Войтович, В.С. Руденко, М.В. Лукьяненко, В.Е. Тонкаль, Н.Н. Лаптев, Е.В. Машуков, В.И. Мелешин, Д.А. Шевцов, М.А. Дыбко, В.М. Андреев, В.А. Грилихес, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, А.Е. Усков, В.Д. Румянцев, Ю.С. Забродин и др.

Потребность в повышении коэффициента полезного действия и коэффициента мощности СП при передаче электрической энергии от СБ в сеть переменного тока является одной из важнейших задач научных исследований. В связи с этим, данная работа, посвященная одному из способов такого повышения за счет разработки силовой схемы СП и принципа его синхронизации с сетью переменного тока, является актуальной и имеет несомненный практический интерес.

Целью диссертационной работы является повышение коэффициента мощности и коэффициента полезного действия статического преобразователя солнечной фотоэлектрической установки при условии передачи в магистральную сеть переменного тока максимально возможной энергии от солнечной батареи.

Для достижения указанной цели поставлены следующие основные **задачи**.

1. Провести анализ известных способов построения солнечных фотоэлектрических установок и схемотехнических решений силовой схемы СП, функционирующего с солнечной батареей.

2. Разработать силовую схему СП с повышенным коэффициентом полезного действия, которая будет обеспечивать условия передачи в магистральную сеть переменного тока максимально возможную энергию от солнечной батареи при безопасном для человека уровне тока утечки.

3. Разработать принцип синхронизации СП с сетью переменного тока, при котором будут обеспечены функционирование солнечной батареи с максимально возможной выходной мощностью и коэффициентом мощности близким к единице при передаче электрической энергии от солнечной батареи в сеть переменного тока.

4. Разработать математическую и компьютерную модели СП для исследования рабочих процессов, которые будет учитывать особенности разработанной силовой схемы и принципа синхронизации СП с сетью переменного тока.

5. Провести экспериментальную проверку на макетном образце основных теоретических положений, результатов компьютерного моделирования, работоспособности разработанной силовой схемы и принципа синхронизации СП с магистралью сети переменного тока.

Объект исследования. Система электроснабжения различных объектов с использованием солнечных фотоэлектрических установок.

Предмет исследования. Статический преобразователь, работающий в составе солнечной фотоэлектрической установки.

Методы исследования. При решении поставленных задач в диссертационной работе использованы аналитические методы теоретической электротехники, методы математического анализа, методы оптимизации, современные программные продукты компьютерного моделирования и методы экспериментальных исследований. При проведении расчетов параметров СП применен математический пакет MathCAD. Для компьютерного моделирования схемотехнического решения и проверки положений диссертационной работы использован программный продукт PSIM.

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

1. Предложены новые признаки (способы соединения фотоэлектрических модулей, устранения токов утечки, подключения накопителей энергии, а также схемотехнические решения СП) и разработана классификация солнечных фотоэлектрических установок. Представлены критерии для сравнения по каждому из признаков, которые позволяют осуществлять рациональный выбор структуры солнечной фотоэлектрической установки и синтез силовой схемы СП в зависимости от области применения.

2. Предложен способ передачи электрической энергии от солнечной батареи в сеть переменного тока с коэффициентом мощности близким к единице и синхронизации СП с сетью переменного тока с помощью

разработанной двухконтурной системы регулирования инвертора СП. При этом СБ функционирует с максимально возможной выходной мощностью. Один из контуров предложенной системы регулирования инвертора СП отвечает за формирование сигнала ошибки, характеризующего отклонение напряжения промежуточного звена постоянного тока СП от заданного значения, а второй – за формирование управляющего сигнала для ШИМ инвертора СП под воздействием сигнала с выходного датчика тока инвертора СП.

3. Разработаны математическая и компьютерная модели для предложенного в данной работе СП, позволяющие проводить анализ и исследование переходных и установившихся процессов в СП в широком диапазоне изменения исходных данных. Особенностью компьютерной модели является применение разработанного программного модуля с целью использования в компьютерном моделировании предложенного двухконтурного принципа регулирования СП.

4. Предложен алгоритм проектирования силовой части СП, при котором посредством применения разработанной компьютерной модели определяют частоту преобразования электрической энергии и параметры силовых компонентов СП в зависимости от требований к массе, коэффициенту полезного действия или стоимости СП.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана силовая схема СП, обеспечивающая снижение токов утечки и потерь мощности на 15-20% по сравнению с известными аналогами при передаче максимально возможной выходной мощности от солнечной батареи. Кроме того, в силовой схеме реализуется балансировка напряжения конденсаторов в промежуточном звене постоянного тока СП. Получен положительный результат формальной экспертизы Федерального института промышленной собственности (ФИПС) от 14.10.16 на предложенную силовую схему СП (заявка №2016129030 на патент РФ от 15.07.2016).

2. Обеспечена передача электрической энергии от солнечной батареи в сеть переменного тока при коэффициенте мощности близкому к единице при помощи предложенного принципа двухконтурной системы регулирования инвертора СП.

3. Разработана компьютерная программа, которая реализует предложенный принцип двухконтурной системы регулирования инвертора в системе управления СП. Данная программа с использованием динамически подключаемой библиотеки позволяет дополнить программный продукт компьютерного моделирования PSIM с целью применения предложенного принципа регулирования инвертора СП. Программа защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660668 от 20.09.2016.

4. Разработана компьютерная модель предложенной силовой схемы СП, которая позволяет проводить анализ и исследование рабочих процессов в СП в широком диапазоне исходных данных с использованием характеристик полупроводниковых приборов, заявленных производителем.

5. Разработан алгоритм проектирования силовой части СП, позволяющий осуществлять рациональный выбор частоты преобразования электрической энергии, как в повышающем конвертере, так и в выходном инверторе, и, соответственно, рациональный выбор полупроводниковых и реактивных элементов силовой схемы в зависимости от требований минимума массы, максимума коэффициента полезного действия или минимума стоимости устройства.

6. Создан макетный образец СП, с помощью которого экспериментально показана работоспособность разработанной силовой схемы и предложенного принципа двухконтурной системы регулирования инвертора СП, а также подтверждена справедливость полученных результатов компьютерного моделирования. Таким образом, экспериментально подтверждено, что в дальнейшем целесообразно применять разработанную компьютерную модель при проектировании СП на основе предложенной силовой схемы и принципа регулирования инвертора.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Новая классификация солнечных фотоэлектрических установок и СП, основанная на совокупности новых классификационных признаков (способов соединения фотоэлектрических модулей, устранения токов утечки, подключения накопителей энергии и схемотехнических решений СП). Представлены критерии сравнения по каждому из признаков, которые дают возможность осуществлять рациональный выбор структуры солнечной фотоэлектрической установки и синтез силовой схемы СП в зависимости от области применения.

2. Принцип двухконтурной системы регулирования инвертора СП, который обеспечивает передачу электрической энергии от солнечной батареи в магистральную сеть переменного тока с максимально возможной выходной мощностью и при коэффициенте мощности близкому к единице.

3. Математическая и компьютерная модели разработанного СП позволяют проводить исследования рабочих процессов в широком диапазоне исходных данных и подтвердить снижение мощности потерь на 15-20% в разработанной силовой схеме СП по сравнению с известными аналогами, а также подтвердить работоспособность принципа двухконтурной системы регулирования инвертора СП с помощью написанного на языке Си программного модуля.

4. Алгоритм проектирования силовой части СП позволяет осуществлять рациональный выбор частоты преобразования электрической энергии с учетом критерия минимизации массы устройства.

5. Сопоставительная оценка результатов экспериментальных исследований на макетном образце СП и компьютерного моделирования.

Реализация результатов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы были использованы при разработке преобразователей стендового типа ПС120 УХЛ4**, предназначенного для проведения испытаний асинхронного тягового двигателя, и преобразователя типа ПС70-02 УХЛ4, предназначенного для электропитания тягового двигателя при проведении испытаний колесно-моторного блока грузового электровоза.

Теоретические положения диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры 310 «Энергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ.

Достоверность полученных результатов. Основные положения и результаты диссертационной работы проверены и оценены путем сопоставления результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования и экспериментальных исследований на макетном образце разработанного СП.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Восемнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и электроэнергетика» (Москва, 2012 г.), на двух международных конференциях Power Conversion and Intelligent Motion Europe (Нюрнберг, 2012 г. и 2013 г.), на всероссийской научно-технической конференции «XI научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского» (Москва, 2014 г.) и на XLII международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения - 2016» (Москва, 2016 г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 11 научно-технических статей, среди которых 3 – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России. Подана заявка №2016129030 от 15.07.2016 на патент РФ (положительный результат формальной экспертизы ФИПС от 14.10.16) и получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660668 от 20.09.2016.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и четырех приложений. Общий объем диссертации составляет 165 страниц, включающие список литературы из 152 наименований, 58 рисунков и 20 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика работы, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна и практическая ценность работы, положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации посвящена анализу особенностей работы СФУ и их способов построения с использованием существующих структурных схем, а также схмотехнических решений СП. Предложена структура СФУ.

Анализ технической литературы показал, что целесообразно разделять СФУ по новым классификационным признакам, которые определяют область

применения и структуру СФУ: по способам соединения фотоэлектрических модулей (ФМ), устранению токов утечки и подключению накопителя энергии, в частности аккумуляторной батареи (АБ).

Каждый из способов соединения ФМ (центральное, секционное, модульное), характеризуется следующими выбранными критериями:

- 1) количество выходных конвертеров или инверторов;
- 2) потери мощность при рассогласовании;
- 3) наличие шунтирующих диодов;
- 4) наличие блокирующих диодов;
- 5) наличие эффекта горячего пятна.

При этом если первый критерий в основном влияет на стоимость и сложность реализации СФУ, то наличие остальных определяет повышение мощности потерь в СФУ. Кроме этого, центральный и секционный способы соединения ФМ образуют СБ с требуемым уровнем выходной мощности.

В силу конструктивных особенностей СБ и работы СП в СФУ, возникают токи утечки, наличие которых ухудшает качество выходного напряжения, является причиной выхода из строя СБ, а главное представляет собой угрозу поражения электрическим током обслуживающего персонала.

По способу устранения токов утечки СФУ подразделяются на установки с использованием низкочастотных, высокочастотных трансформаторов или без их использования. Среди критериев, характеризующих способы устранения токов утечки, выделяются:

- 1) необходимость применения силового трансформатора;
- 2) уровень частоты преобразования электрической энергии в трансформаторе;
- 3) сравнительные массогабаритные показатели;
- 4) необходимость применения дополнительных силовых ключей;
- 5) сравнительная надежность.

Способ устранения токов утечки без использования трансформатора является наиболее современным и перспективным, т.к. позволяет за счет топологии силовой схемы и методов управления устранить токи утечки без использования трансформатора.

Кроме того, структуру СФУ определяет место подключения АБ (к шине постоянного тока, между конвертером и инвертором, после инвертора к шине переменного тока через двунаправленный преобразователь переменного тока в постоянный ток). С целью проведения сравнительной оценки СФУ в зависимости от места подключения АБ выбраны следующие критерии:

- 1) применение двунаправленного конвертера;
- 2) реализация метода отыскания максимальной мощности (ОТММ) СБ;
- 3) реализация оптимального процесса заряда АБ;
- 4) применение двунаправленного преобразователя переменного тока в постоянный ток.

Наличие первого и четвертого критериев в основном влияет на стоимость и сложность реализации СФУ, в то время как, отсутствие остальных определяет повышение потерь мощности в СП.

На основании предложенных признаков разработана классификация СФУ.

Кроме этого, в первой главе проведена оценка схемотехнических решений конвертеров и инверторов, применяемых в СФУ, таких как: H5 (компания SMA, Германия), HERIC (компания Sunways, Германия), H6D2 (компания Ingeteam, Испания) и др.

Предложенная классификация СФУ и схемотехнических решений СП, в том числе, сформулированные оценочные критерии по каждому из классификационных признаков, позволяет осуществлять рациональный выбор структуры СФУ и синтез силовой схемы СП в зависимости от области применения.

В качестве функциональной схемы СФУ была выбрана структура, представленная на рисунке 1 с возможностью подключения к сети переменного тока, в качестве которой выбрана однофазная сеть переменного тока (220 В, 50 Гц), где А1 – СБ, А2 – повышающий конвертер, А3 – система управления (СУ) конвертером А2, А4 – СУ двунаправленным конвертером А5, А5 – двунаправленный конвертер, А6 – АБ, А7 – инвертор, А8 – СУ инвертором, А9 – выходной фильтр.

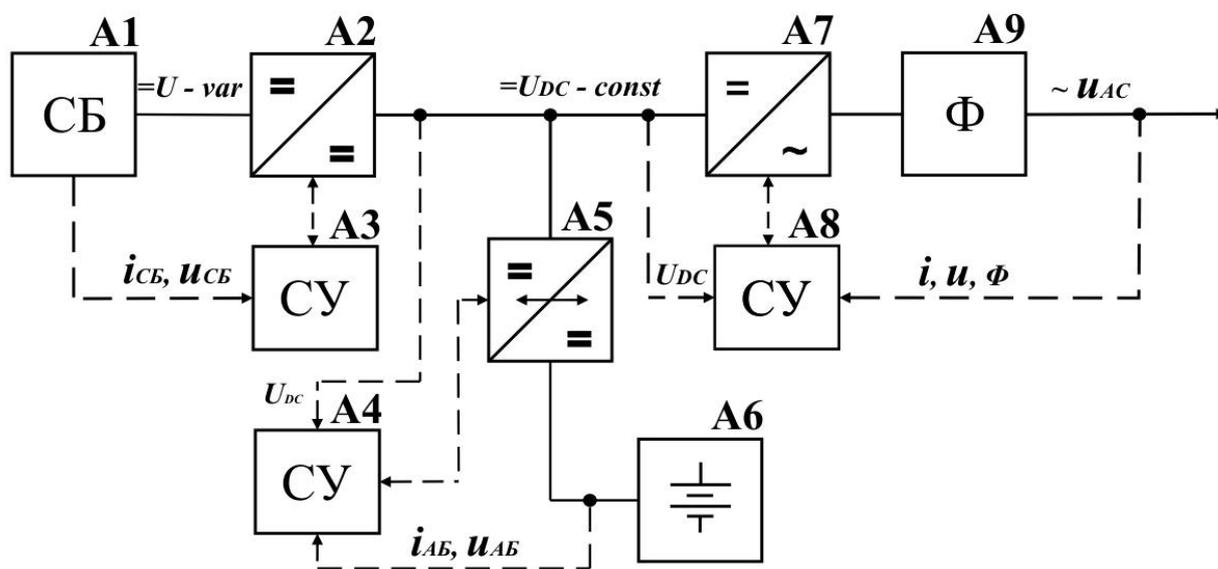


Рисунок 1. Структурная схема СФУ

Данная структура дополнена СУ конвертером А3 и разработанной СУ инвертором А8 по двухконтурному принципу, детальное описание которой представлено во второй главе диссертации. Особенности СУ А3 и А8 являются то, что, во-первых, СУ конвертером А3 на основе данных по току $i_{СБ}$ и напряжению $u_{СБ}$ с использованием метода ОТММ формирует управляющие импульсы на полупроводниковые устройства конвертера А2 с целью генерации

максимальной мощности СБ, а, во-вторых, СУ инвертором А8 обеспечивает синхронизацию инвертора А7 с сетью переменного тока таким образом, чтобы передать электрическую энергию от СБ с коэффициентом мощности равным единице. Коэффициент мощности равный единице достигается синхронизацией по фазе тока инвертора СП с напряжением магистральной сети, исключая тем самым реактивную составляющую при передаче электрической энергии от СБ в сеть переменного тока.

Кроме этого, посредством двунаправленного конвертера А5 и его СУ А4 обеспечивается обмен электрической энергией между промежуточным звеном постоянного тока и АБ с заданными параметрами по току i_{AB} и напряжению u_{AB} , уровни которых определяются типом АБ.

Анализ разработанной силовой схемы с использованием созданной компьютерной модели СП в составе повышающего конвертера А2, двунаправленного конвертера А3 и инвертора А8, представлен в третьей главе диссертации.

Во второй главе рассмотрена одна из ключевых задач, стоящих перед разработчиками СП СФУ – синхронизация инвертора СП с сетью переменного тока.

При проектировании СФУ возникают две задачи. Одна из них связана с организацией генерирования электрической энергии СБ с максимально возможной выходной мощностью. Вторая задача - организация эффективной передачи выходной мощности, генерируемой СБ, в сеть переменного тока.

Анализ существующих способов синхронизации инвертора СП с сетью переменного тока и особенности работы СБ позволили разработать принцип двухконтурной системы регулирования (ДСР) инвертора СП.

При подключении к СБ конвертера, работающего с использованием метода отыскания точки максимальной мощности (ОТММ), обеспечивается генерация электрической энергии СБ с максимально возможной выходной мощностью. В этом случае рабочий участок ВАХ СБ совместно с конвертером ближе к ВАХ идеального источника тока, чем к ВАХ идеального источника напряжения, как АБ. Предложенный принцип ДСР инвертора СП основан на том, что в случае постоянства напряжения промежуточного звена, существует однозначная связь между выходным током конвертера и выходным током инвертора СП, который синхронизируется с сетью переменного тока, что позволяет обеспечить передачу электрической энергии от СБ в сеть переменного тока с коэффициентом мощности близким к единице.

Структурная схема разработанного принципа ДСР (рисунок 2) содержит: силовой инвертор (А1), блок ШИМ (А2), выходной силовой фильтр (А3), выходной контактор (К1), контур регулирования по току (А4), контур регулирования по напряжению (А5), блок синхронизации (А6), датчики напряжения (ДН1, ДН2) и датчик тока (ДТ1). Блок синхронизации А6 на базе фазовой автоподстройки частоты позволяет исключить зависимость формируемого выходного тока инвертора от напряжения сети переменного тока.

Предложенная ДСР инвертора СП функционирует следующим образом. Посредством сигнала δ_{uDC} контура регулирования (А5), характеризующего отклонение напряжения на промежуточном звене постоянного тока СП от заданного значения, и сигнала искомой фазы Φ' с блока синхронизации с сетью переменного тока А6, в контуре регулирования по току А4 формируется сигнал $u_{\alpha \text{ упр}}$, под воздействием которого блок ШИМ А2 вырабатывает управляющие сигналы на силовые ключи силового инвертора А1.

Таким образом, отличительной особенностью предложенного принципа ДСР инвертора СП от существующих способов работы инвертора с сетью является то, что стабилизируя напряжение промежуточного звена постоянного тока за счет регулирования выходного тока инвертора СП при минимальном отклонении искомой фазы Φ' от текущей фазы Φ , обеспечивается полная передача электрической энергии от СБ, генерируемой с использованием метода ОТММ, в сеть переменного тока с коэффициентом мощности близким к единице.

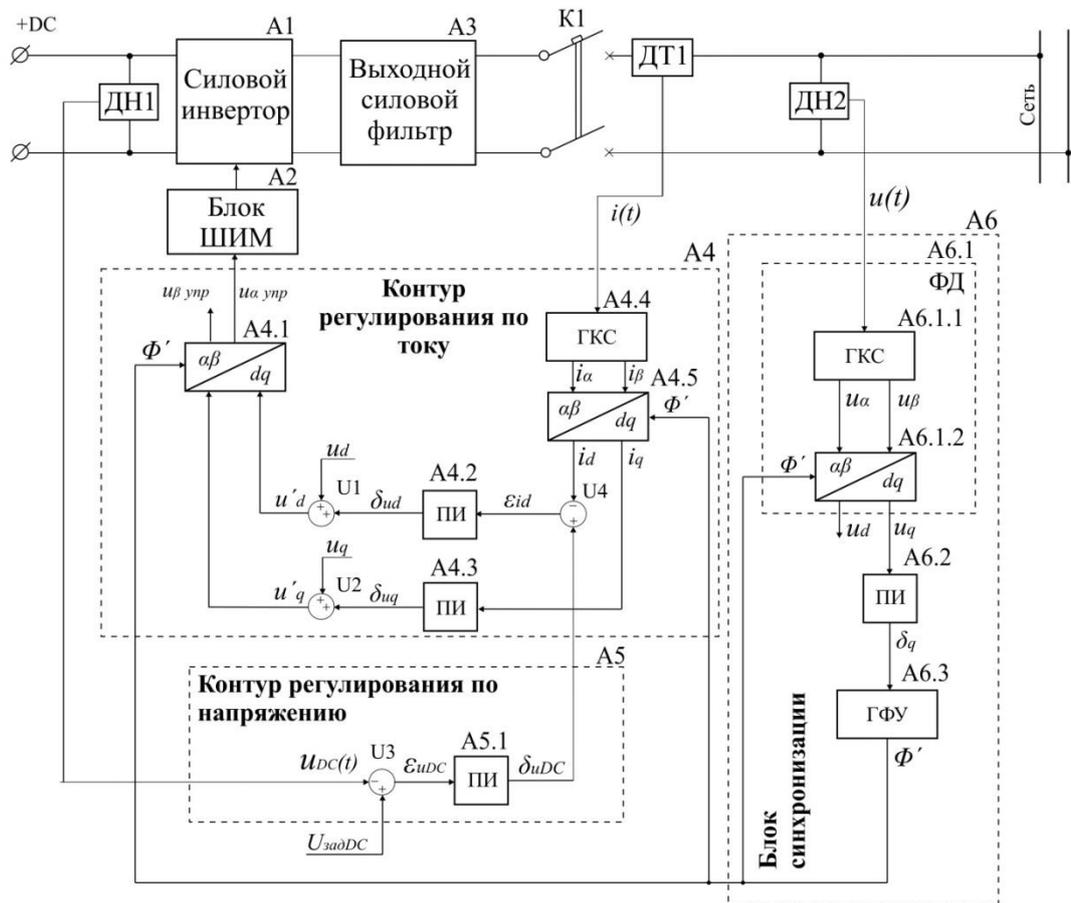


Рисунок 2. Структурная схема двухконтурной системы регулирования инвертора СП

В третьей главе представлена разработанная схема СП, работающего совместно с СБ, а также компьютерная модель СП в программном продукте PSIM с целью исследования рабочих процессов в СП.

Комплексный анализ, проведенный в первой главе, с учетом достоинств различных схемотехнических решений составных компонентов СП позволил синтезировать в совокупности оригинальную силовую схему СП (рисунок 3), где U_{ex} – напряжение, которое поступает от СБ на вход СП; $L1$, $VT1$, $VT2$, $VD1$ - $VD3$ – компоненты повышающего конвертера СБ; $C1$ и $C2$ – конденсаторы промежуточного звена постоянного тока; $VT3$ - $VT6$, $VD4$ и $VD5$ – компоненты выходного инвертора; $A1$ – двунаправленный конвертер; $L2$ и $C3$ – компоненты выходного синус-фильтра; $K1$ – контактор; U_{AB} – напряжение АБ; $u_{вых}$ – выходное напряжение СП.

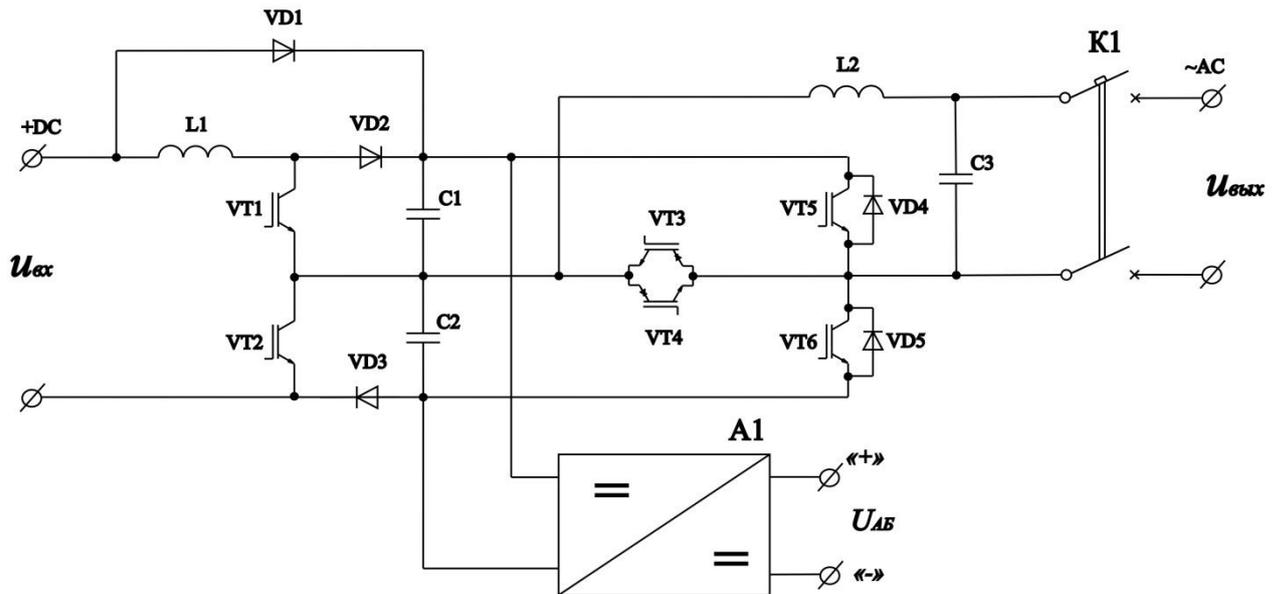


Рисунок 3 – Разработанная силовая схема СП

В отличие от существующих технических решений, разработанная силовая схема СП позволяет решить две группы задач:

1. Обеспечивает максимальную выходную мощность СБ с использованием повышающего конвертера и применением метода ОТММ. Кроме того, снижается уровень токов утечки, возникающих при работе СП с СБ, что достигается применением выходного инвертора со средней точкой, образованной конденсаторами $C1$ и $C2$ промежуточного звена постоянного тока.

2. Позволяет обеспечивать балансировку напряжения на конденсаторах $C1$, $C2$ для устранения проблем технологического разброса характеристик конденсаторов и их негативного влияния на работу СП. При этом совокупность внесенных в силовую схему новшеств обеспечивает повышение коэффициента полезного действия за счет:

- возможности применения сравнительно низковольтных силовых транзисторов $VT1$ и $VT2$, имеющих низкие коммутационные потери и малые падения напряжения насыщения;

- шунтирования низкочастотным силовым диодом VD1 дросселя L1 и высокочастотного силового диода VD2 в случае превышения выходного напряжения СБ значения напряжения промежуточного звена постоянного тока;

- снижения уровня реактивного тока, возвращаемого в промежуточное звено постоянного тока, посредством использования силовых транзисторов VT3 и VT4;

- применения RB-IGBT, которые позволяют за счет своих уникальных технических характеристик, определяющих стойкость к прямому и обратному напряжению между силовыми выводами «коллектор – эмиттер», исключить из силовой схемы инвертора последовательно включенные силовые диоды;

- снижения индуктивности, а, соответственно, активного сопротивления обмотки дросселя L1, благодаря возможности повышения рабочей частоты силовых транзисторов VT1 и VT2.

В третьей главе разработана математическая модель предложенной силовой схемы СП. Однако для данной математической модели отсутствует простое аналитическое решение в связи с большим количеством межкоммутационных интервалов полупроводниковых ключей в силовой схеме, что приводит к необходимости использования компьютерной модели в программном продукте PSIM.

С целью исследования рабочих процессов в предложенной силовой схеме СП и подтверждения работоспособности принципа ДСР инвертора СП разработана компьютерная модель силовой схемы СП, а также СУ конвертером (рисунок 4) и инвертором (рисунок 5) в программном продукте PSIM. Кроме этого, посредством использования модуля C block (Inverter control block) в среде PSIM запускается разработанная программа на языке Си, реализующая предложенный принцип ДСР инвертора СП при работе с сетью переменного тока.

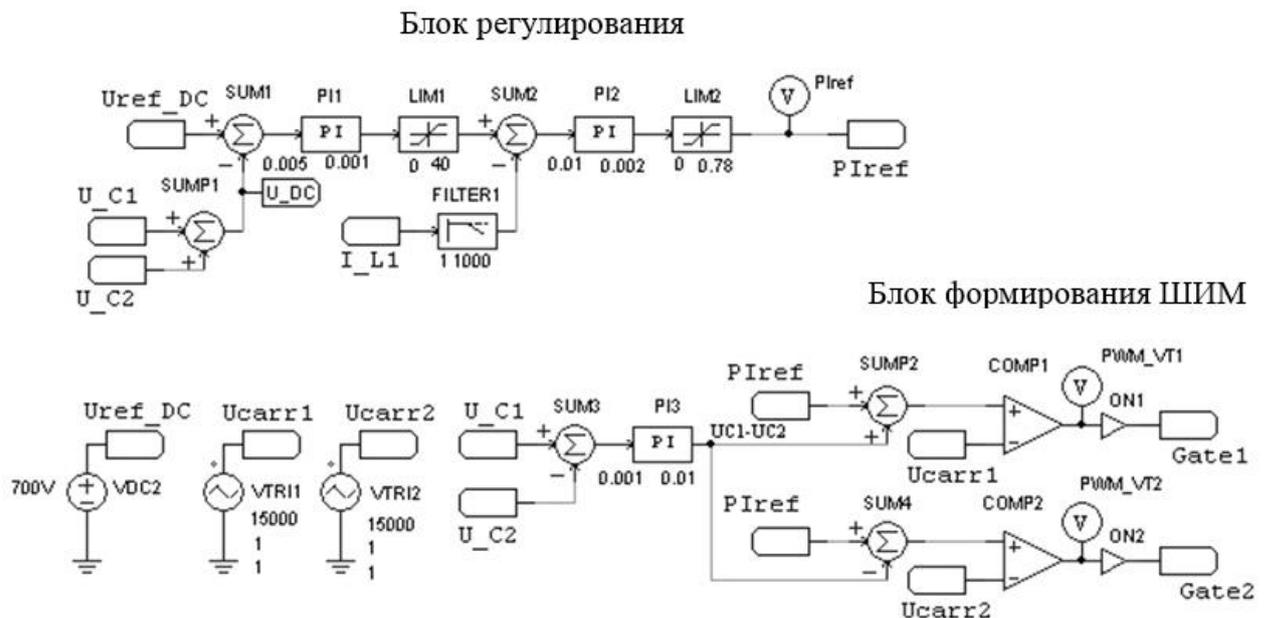


Рисунок 4. Система управления конвертером СП

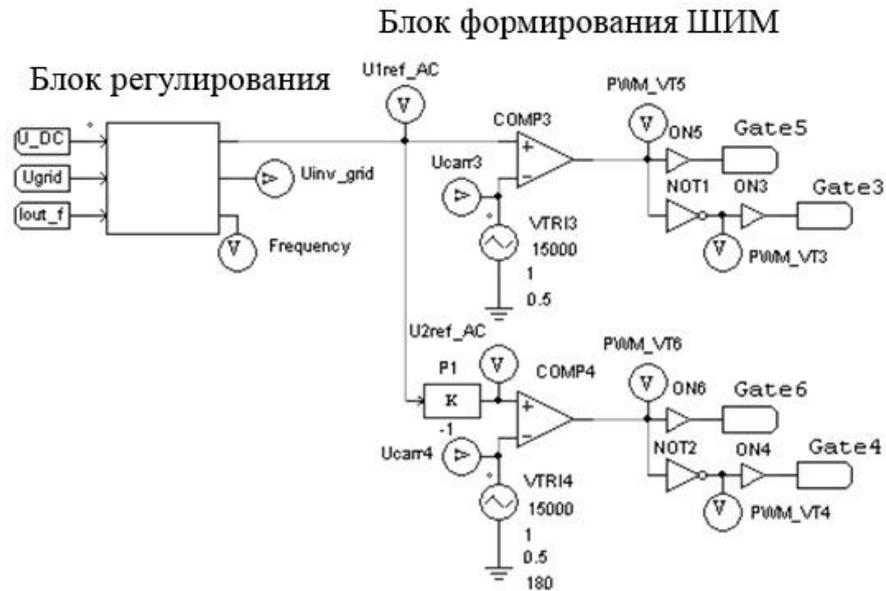


Рисунок 5. Система управления инвертором СП

Работоспособность СУ повышающего конвертера разработанной компьютерной модели подтверждена путем искусственного изменения напряжения на одном из конденсаторов C1, C2. СУ после возмущающего воздействия осуществляет выравнивание среднего уровня напряжений на конденсаторах C1 и C2.

Примером работоспособности предложенного принципа ДСР выходного инвертора СП являются результаты компьютерного моделирования, приведенные на рисунках 6-8, где кривая 1 - мгновенные значения напряжения U_{grid} магистральной сети; кривая 2 - мгновенные значения выходного напряжения (U_{inv_grid}) СП при разомкнутом силовом контакторе К1; кривая 3 – значения частоты выходного напряжения СП; кривая 4 – мгновенное значение тока выходного СП при замкнутом силовом контакторе К1.

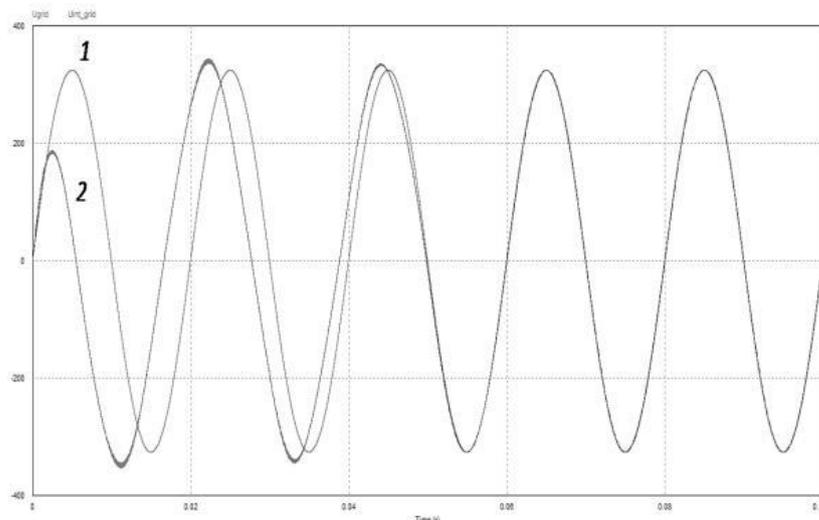


Рисунок 6. Осциллограмма мгновенных значений напряжений магистральной сети переменного тока и инвертора

Как видно из кривых, представленных на рисунках 6 и 7, разработанная СУ СП успешно синхронизирует выходное напряжение инвертора СП с напряжением сети переменного тока. В течение 55 мс (немного более двух периодов выходного напряжения) выходное напряжение СП начинает совпадать по фазе с напряжением сети переменного тока. Кроме того, на рисунке 8 видно, что после подключения СП к сети выходной ток имеет сдвиг фазы относительно напряжения сети переменного тока равным нулю. Данный результат подтверждает, что разработанный принцип ДСР инвертора СП обеспечивает коэффициент мощности СП близкий к единице при работе с сетью переменного тока.

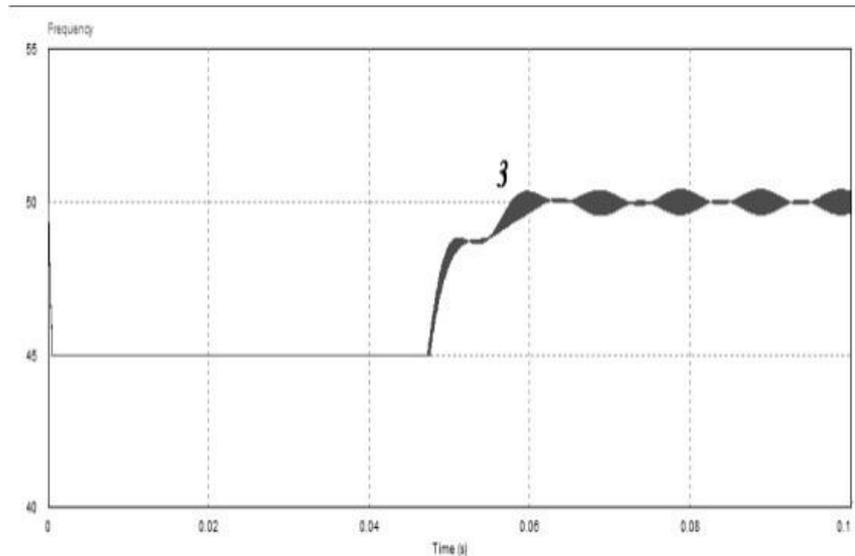


Рисунок 7. Частота выходного напряжения СП

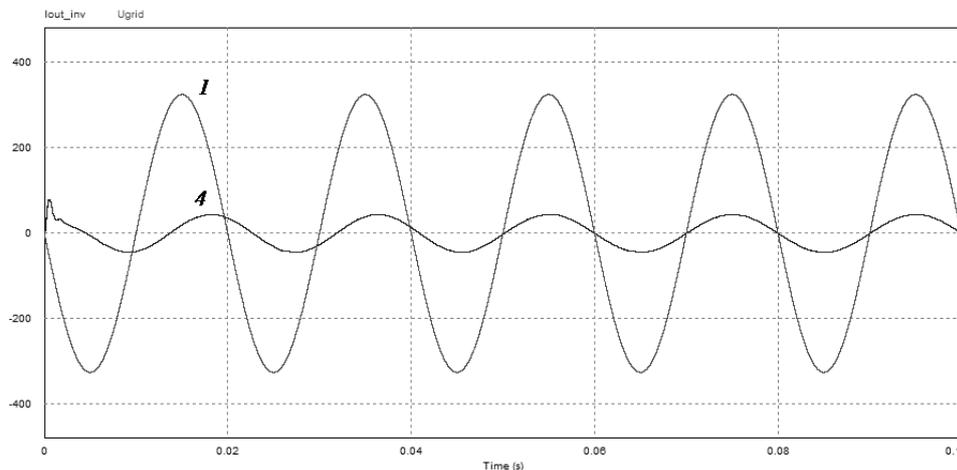


Рисунок 8. Осциллограмма мгновенных значений напряжения магистральной сети переменного тока и выходного тока СП

В ходе компьютерного моделирования были получены зависимости мощности потерь в транзисторах VT1, VT3, VT5 и силовом диоде от величины входного напряжения (при частоте коммутации 5 кГц) и частоты коммутации полупроводниковых приборов (при входном напряжении 200 В). Данные зависимости представлены на рисунках 9 и 10 соответственно.

Анализ показывает, что уровень мощности потерь на силовом транзисторе VT1 (VT2) и силовом диоде VD2 (VD3) падает с ростом входного напряжения, что обусловлено снижением тока потребления СП. В то же время, величина мощности потерь в силовых транзисторах VT3-VT6 мало зависит от входного напряжения, благодаря сравнительной стабильности напряжения промежуточного звена постоянного тока.

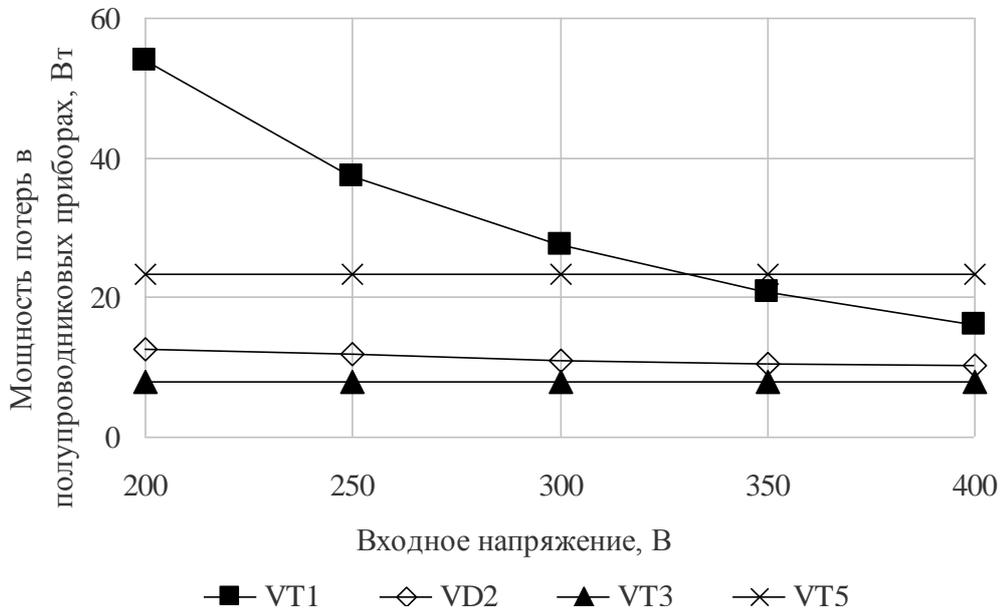


Рисунок 9. Зависимость мощности потерь в полупроводниковых приборах от величины входного напряжения

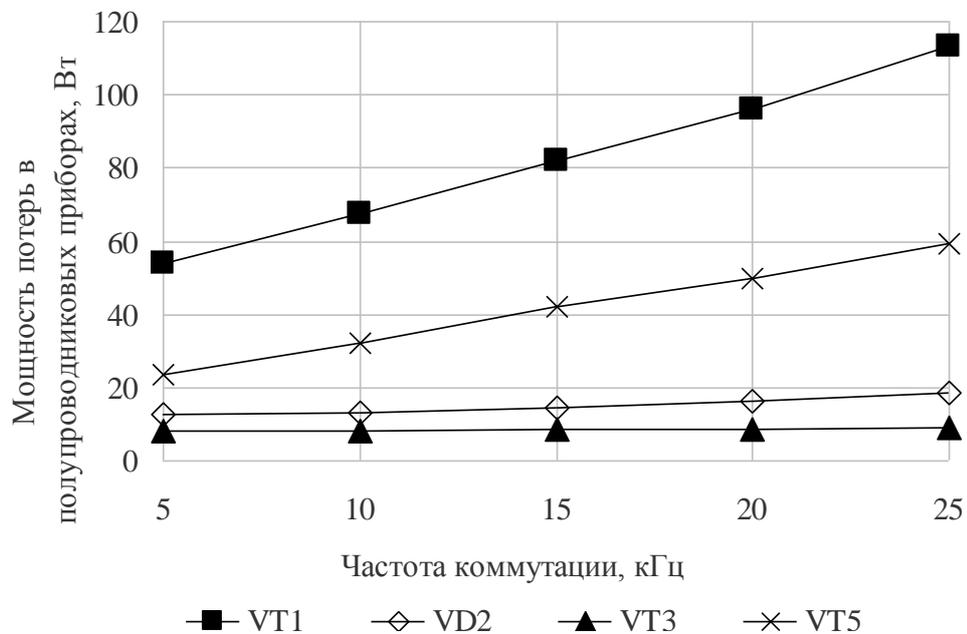


Рисунок 10. Зависимость мощности потерь в полупроводниковых приборах от частоты коммутации полупроводниковых приборов

Низкий уровень мощности потерь в силовых транзисторах VT3 и VT4 обусловлен тем, что согласно принципу действия, при формировании отрицательной полуволны выходного напряжения СП транзистор VT3 находится в открытом состоянии, ввиду чего присутствуют только потери на проводимость. Аналогичные рассуждения справедливы и для транзистора VT4 при формировании положительной полуволны выходного напряжения СП.

Между тем, с ростом частоты коммутации силовых ключей СП потери мощности в силовых полупроводниковых приборах имеют тенденцию к росту.

С целью подтверждения снижения уровня мощности потерь в разработанной схеме СП проведен сравнительный анализ с широко применяемой силовой схемой, выбранной в качестве прототипа и состоящей из входного повышающего конвертера и выходной полумостовой схемы инвертора, в которой нулевую паузу формируют транзисторы с последовательно включенными диодами. На рисунках 11 и 12 приведены кривые суммарных потерь в полупроводниковых приборах повышающего конвертера и выходного инвертора разработанной силовой схемы, и прототипа в зависимости от частоты коммутации полупроводниковых приборов f_{np} при входном напряжении равном 200 В и 400 В соответственно.

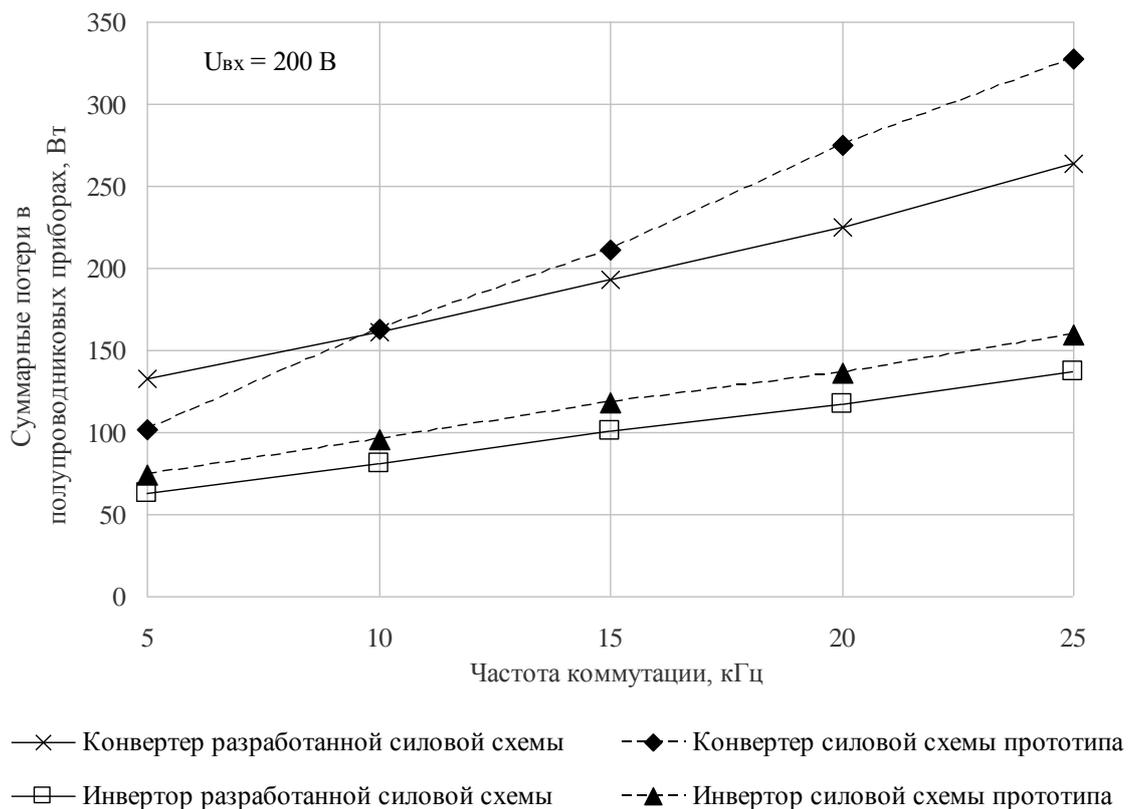


Рисунок 11. Кривые суммарных потерь в полупроводниковых приборах повышающего конвертера и выходного инвертора

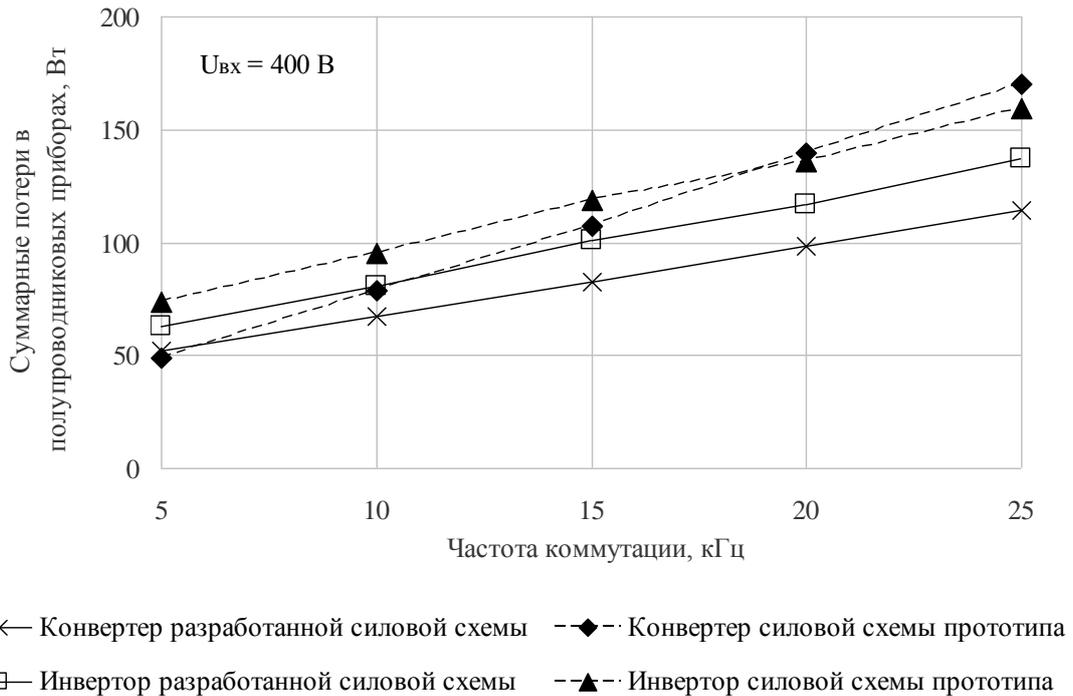


Рисунок 12. Кривые суммарных потерь в полупроводниковых приборах повышающего конвертера и выходного инвертора

Для разработанной силовой схемы суммарные мощности потерь в силовых полупроводниковых приборах повышающего конвертера с ростом частоты f_{np} принимают меньшие значения, чем аналогичные потери в прототипе за счет возможности использования более эффективных транзисторов VT1 и VT2. Вместе с тем, суммарные потери мощности в силовых полупроводниковых приборах выходного инвертора разработанной силовой схемы независимо от частоты f_{np} имеют на 16-18% меньшие значения по сравнению с аналогичными потерями в прототипе, благодаря применению силовых транзисторов VT3 и VT4 с обратной запирающей способностью.

В таблицах 1 и 2 приведены значения общих потерь мощности с учетом потерь во входном дросселе L1 повышающего конвертера и дросселе L2 выходного синус-фильтра СП при U_{ex} равном 200 В и 400 В соответственно.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что с одной стороны, в разработанной силовой схеме можно достигнуть снижение общей мощности потерь на 15-20% в повышающем конвертере и выходном инверторе при одинаковой с прототипом частоте f_{np} . С другой стороны, можно снизить величину индуктивности, а тем самым массу дросселей L1 и L2, за счет повышения частоты f_{np} до 20 кГц при равных соответствующих общих потерях мощности.

Таблица 1. Значения общих потерь мощности при $U_{ex} = 200$ В

Потери мощности при $U_{ex} = 200$ В	Частота коммутации f_{np}				
	5 кГц	10 кГц	15 кГц	20 кГц	25 кГц
Потери в разработанной схеме, Вт	416,92	397,90	421,45	463,67	499,46
Потери в прототипе, Вт	453,65	455,27	490,00	550,06	611,09
Отклонение, %	-8,10	-12,60	-13,99	-15,71	-18,27

Таблица 2. Значения общих потерь мощности при $U_{ex} = 400$ В

Потери мощности при $U_{ex} = 400$ В	Частота коммутации f_{np}				
	5 кГц	10 кГц	15 кГц	20 кГц	25 кГц
Потери в разработанной схеме, Вт	235,40	233,46	253,69	279,45	305,42
Потери в прототипе, Вт	257,89	269,32	303,85	343,04	389,42
Отклонение, %	-8,72	-13,32	-16,51	-18,54	-21,57

В четвертой главе предложен алгоритм проектирования силовой части СП, описано экспериментальное исследование на макетном образце и дана сравнительная оценка экспериментальным и теоретическим данным, полученным в ходе компьютерного моделирования.

Для проектирования СП разработан алгоритм, который позволяет рационально выбрать частоту преобразования электрической энергии с учетом минимальной массы СП. С одной стороны, повышение частоты преобразования электрической энергии оказывает влияние на снижение массы реактивных элементов силовой схемы, а с другой стороны, происходит рост потерь мощности, включая силовые полупроводниковые приборы, что обуславливает необходимость повышения площади и, соответственно, массы радиатора.

Основные ответвления алгоритма направлены на проверку правильности предварительного расчета параметров реактивных элементов и определения минимальных масс конвертера и инвертора при изменении частоты преобразования электрической энергии в СП.

Предложенный принцип построения алгоритма проектирования силовой части СП за счет универсального характера может быть использован как при выборе критерия массы или стоимости, так и при выборе коэффициента полезного действия в зависимости от частоты преобразования электрической энергии.

С целью подтверждения результатов, полученных в ходе компьютерного моделирования, был разработан макетный образец СП (рисунок 13).



Рисунок 13. Макетный образец СП

В результате проведения экспериментальных исследований на макетном образце подтверждена работоспособность предложенной ДСР инвертора СП. В качестве примера на рисунке 14 представлены осциллограммы напряжения (кривая 1) и тока (кривая 2) СП при подключении к сети переменного тока.

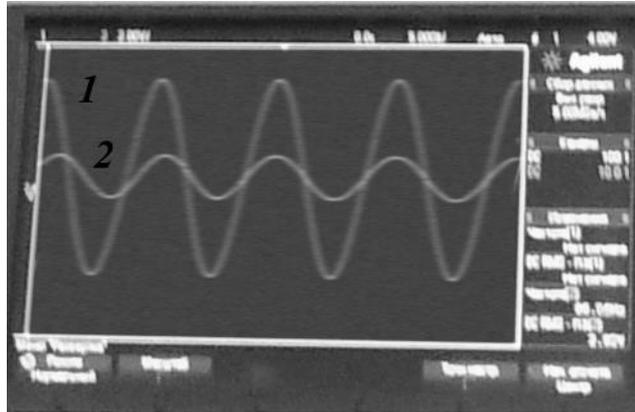


Рисунок 14. Осциллограммы напряжения и тока СП

В таблице 3 приведены результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования, где P_K и P'_K – общие мощности потерь в повышающем конвертере, включая входной дроссель L1, а также конденсаторы C1 и C2, полученные в ходе компьютерного моделирования и эксперимента соответственно; ΔP_K – отклонение между значениями P_K и P'_K , относительно P'_K ; P_{II} и P'_{II} – общие мощности потерь в выходном инверторе, включая дроссель L2 и конденсаторы C3 выходного синус-фильтра, полученные в ходе компьютерного моделирования и эксперимента соответственно; ΔP_{II} – отклонение между значениями P_{II} и P'_{II} , относительно P'_{II} ; η , η' – коэффициент полезного действия, рассчитанный в ходе компьютерного моделирования и эксперимента соответственно; η_n – коэффициент полезного действия прототипа, рассчитанный в ходе компьютерного моделирования.

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования

$U_{вх}, В$	$P_K, Вт$	$P'_K, Вт$	$\Delta P_K, \%$	$P_{II}, Вт$	$P'_{II}, Вт$	$\Delta P_{II}, \%$	$\eta, \%$	$\eta', \%$	$\eta_n, \%$
200	300,92	310,84	3,30	162,75	168,52	3,54	93,22	92,99	92,14
250	224,54	229,81	2,35	162,50	167,41	3,02	94,34	94,19	93,58
300	176,54	171,13	-3,06	162,43	160,73	-1,05	95,05	95,15	94,33
350	141,44	136,67	-3,37	162,90	158,80	-2,52	95,55	95,68	94,74
400	117,11	113,92	-2,72	162,34	158,31	-2,48	95,92	96,02	95,01

В ходе экспериментальных исследований была доказана работоспособность разработанной силовой схемы СП и предложенного принципа ДСР инвертора СП.

Сравнительная оценка экспериментальных данных мощности потерь с результатами компьютерного моделирования позволила сделать вывод о достаточно высокой достоверности результатов компьютерного моделирования. Расхождение составляет не более 3,54%, что допустимо с точки зрения инженерного проектирования и выбора элементов силовой схемы СП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные и практические результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ технической литературы и существующих решений по конфигурации СФУ и схемотехнических решений СП, который позволил разработать классификацию СФУ по новым классификационным признакам (способам соединения ФМ, устранения токов утечки и подключения накопителей энергии). Сформулированные критерии по каждому из классификационных признаков и схемотехническим решениям СП позволяют осуществлять рациональный выбор структуры СФУ и синтез силовой схемы СП в зависимости от области применения.

2. Разработана силовая схема СП, обеспечивающая максимальную мощность СБ и позволяющая снизить токи утечки. При этом за счет совокупности схемотехнических решений и применения новой элементной базы достигнуто снижение мощности потерь на 15-20% по сравнению с известными аналогами, а также осуществляется балансировка напряжения конденсаторов в промежуточном звене постоянного тока СП. На предложенную силовую схему СП получен положительный результат формальной экспертизы ФИПС от 14.10.16 (заявка №2016129030 на патент РФ от 15.07.2016).

3. Разработан принцип двухконтурной системы регулирования инвертора СП, в котором один из контуров отвечает за формирование сигнала ошибки, характеризующего отклонение напряжения промежуточного звена постоянного тока СП от заданного значения, а второй – за формирование управляющего сигнала для ШИМ инвертора СП. Данный принцип позволяет синхронизировать СП с сетью переменного тока и обеспечить передачу электрической энергии от СБ в сеть с коэффициентом мощности близкому к единице.

4. Разработана компьютерная программа, реализующая предложенный принцип двухконтурной системы регулирования инвертора в системе управления СП. Данная программа дополняет программный продукт компьютерного моделирования PSIM с помощью динамически подключаемой библиотеки. Программа защищена свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660668 от 20.09.2016.

5. Созданы математическая и компьютерная модели с учетом особенностей разработанной силовой схемы СП, которые позволяют проводить исследования и анализ рабочих процессов в силовой схеме СП.

6. Предложен алгоритм проектирования силовой части СП, который позволяет осуществлять рациональный выбор частоты преобразования электрической энергии в СП с учетом минимума массы, коэффициента полезного действия или стоимости СП.

7. Создан макетный образец СП и экспериментально подтверждены на нем: справедливость полученных теоретических положений, результатов компьютерного моделирования разработанной силовой схемы СП; работоспособность предложенного принципа двухконтурной системы регулирования инвертора СП с целью синхронизации СП с магистральной сетью переменного тока и передачи электрической энергии от СБ в сеть с коэффициентом мощности близкому к единице; снижение суммарных потерь мощности в СП на 15-20% по сравнению с известными аналогами.

8. Результаты диссертационной работы в части предложенного принципа двухконтурной системы регулирования инвертора СП, были использованы при разработке преобразователей стендового типа ПС120 УХЛ4**, предназначенного для проведения испытаний асинхронного тягового двигателя, и преобразователя типа ПС70-02 УХЛ4, предназначенного для электропитания тягового двигателя при проведении испытаний колесно-моторного блока грузового электровоза, что подтверждено Актом о практическом использовании от 13 сентября 2016 г.

9. Положения диссертационной работы использованы в учебном процессе кафедры 310 «Энергетические, электромеханические и биотехнические системы» МАИ, что подтверждено Актом внедрения в учебный процесс Московского авиационного института от 12 сентября 2016 г.

Таким образом, в диссертационной работе решена научно-техническая задача по повышению эффективности СП, работающего совместно с СБ, что способствует дальнейшему развитию применения СФУ в отдельных районах России.

**Основные положения диссертации опубликованы в работах:
Статьи в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:**

1. Дякин С.В. Проблемы синхронизации инвертора с сетью / С.В. Дякин, Д.А. Ниткин, С.И. Вольский // Практическая силовая электроника. – 2015. – №60. – С. 17-21.
2. Дякин С.В. Способы построения солнечных установок / С.В. Дякин, Д.А. Ниткин, С.И. Вольский // Новое в российской электроэнергетике. – 2016. – №8. – С. 39 – 47.
3. Дякин С.В. Преобразователь энергии в многоагентной системе электроснабжения космического летательного аппарата / С.В. Дякин, Н.В.

Дякин, С.И. Вольский // Вестник Московского авиационного института. – М.: Московский авиационный институт. – 2016. – Т. 23, №1. – С. 210-217.

Другие печатные издания:

4. Dyakin S. The peak power corrector for the apartment buildings / S. Dyakin, N. Dyakin, S. Volskiy // PCIM Europe Conference Proceedings, Nuremberg, Germany, 2012. – P. 1501-1508.
5. Дякин С.В. Корректор пиковой мощности / С.В. Дякин, Н.В. Дякин, С.И. Вольский // Сборник тезисов докладов: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Восемнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – Т.4. – С. 361-362.
6. Dyakin S. Application of multi-converter in the peak power corrector / S. Dyakin, N. Dyakin, S. Volskiy // PCIM Europe Conference Proceedings, Nuremberg, Germany, 2013. – P. 1643-1650.
7. Дякин С.В. Применение преобразователей постоянного тока в авиации и космонавтике / С.В. Дякин // XI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского: Сборник докладов XI Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 17–18 апреля 2014). – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, апрель 2014. – С. 234-237.
8. Дякин С.В. Повышение эффективности применения аккумуляторных батарей на летательных аппаратах / С.В. Дякин, Н.В. Дякин, С.И. Вольский // XI Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н. Е. Жуковского: Сборник докладов XI Всероссийской научно-технической конференции (Москва, 17–18 апреля 2014). – М.: ВВИА им. проф. Н. Е. Жуковского, апрель 2014. – С. 229-233.
9. Дякин С.В. Применение мультиконвертера на летательных аппаратах / С.В. Дякин // Сборник тезисов докладов: Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2014». – М.: ООО «Принт-салон», 22-24 апреля 2014. – С. 105-106.
10. Дякин С.В. Способы решения проблемы синхронизации статических преобразователей с сетью / С.В. Дякин, С.И. Вольский // Сборник тезисов докладов: Московской молодёжной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике – 2015». – М.: ООО «Принт-салон», 21-23 апреля 2015. – С. 77-78.
11. Дякин С.В. Повышение эффективности системы электроснабжения с применением солнечных установок / С.В. Дякин // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов. – М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. – Т. 1. – С. 675-676.

Патенты и свидетельства:

12. Преобразователь электрической энергии / С.В. Дякин, С.И. Вольский, Д.А. Ниткин, Ю.Ю. Скороход, Д.А. Сорокин. Заявка на полезную модель

№2016129030 от 15.07.2016. Получен положительный результат формальной экспертизы ФИПС от 14.10.16.

13. Программа двухканальной системы регулирования инвертора, обеспечивающая синхронизацию с линией переменного тока / С.В. Дякин, Д.А. Ниткин. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016660668 от 20.09.2016.

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертации, опубликованы в работах [7, 9, 11], написанных лично автором. В работах [1, 2, 10] автором проведен анализ технической литературы и разработана классификация, в работах [3, 12] автором разработаны технические решения поставленной задачи, а в работах [4, 5, 6, 8] - функциональные схемы. В работе [13] автором разработаны алгоритм функционирования двухконтурной системы регулирования инвертора СП и его программная реализация на языке Си.