

На правах рукописи



Гришанов Евгений Валерьевич

**СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ
НА БАЗЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ И
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Брованов Сергей Викторович

Официальные оппоненты: **Гарганеев Александр Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ), профессор инженерной школы энергетики

Лопаткин Николай Николаевич, кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет имени В.М. Шукшина» (АГПУ им. В.М. Шукшина), доцент кафедры математики, физики, информатики

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск

Защита состоится 29 ноября 2018 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан «__» октября 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.173.04
кандидат технических наук



М.А. Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В настоящее время в связи с использованием возобновляемых источников энергии широкомасштабное распространение получают системы генерирования электроэнергии, к которым относятся системы в составе ветроэнергетических установок (ВЭУ), гидроэнергетических установок (ГЭУ) и системы генерирования на базе полупроводниковых преобразователей, у которых в качестве первичного источника питания выступают солнечные фотоэлектрические модули (СГФ). По данным международного энергетического агентства (*International Energy Agency – IEA*) на 2016 год в мире совокупная мощность, вырабатываемая ГЭУ, составляла порядка 1200 ГВт, ВЭУ – порядка 466 ГВт и СГФ – более 300 ГВт. А уже к концу 2017 г. мощность СГФ достигла порядка 400 ГВт. Также по данным этого агентства до 98 % систем по мощности работают на электрическую сеть.

Системы генерирования на базе солнечных фотоэлектрических модулей являются самым быстроразвивающимся видом систем генерирования с использованием возобновляемых источников энергии. К примеру, ежегодные темпы роста производства электрической энергии СГФ с 1990 по 2016 гг составляют 43,3 %. Это самые высокие показатели роста производства электрической энергии среди всех видов систем генерирования, использующих возобновляемые источники энергии.

СГФ лишены недостатков, присущих ВЭУ и ГЭУ, связанных с наличием большого количества механических устройств, и, соответственно, этот факт благоприятно сказывается на цене и затратах на техническое обслуживание и эксплуатацию данных систем генерирования. СГФ могут располагаться в непосредственной близости от потребителей электрической энергии, что позволяет снизить потери, связанные с транспортировкой электрической энергии.

В настоящее время сложились два основных типа СГФ, отличающихся в основном по способу гальванической развязки: трансформаторные СГФ и бестрансформаторные СГФ. Бестрансформаторные системы генерирования имеют ряд преимуществ. К примеру, КПД таких систем, как правило, выше по сравнению с трансформаторными системами генерирования, а массогабаритные и стоимостные показатели – ниже. Следует отметить, что отрицательным фактором устранения из структуры системы генерирования трансформатора является появление паразитного синфазного тока утечки (СТУ). СТУ протекает через контуры, включающие в себя паразитные элементы схемы системы генерирования (емкости и индуктивности). Наличие СТУ приводит к ухудшению энергетических показателей качества преобразования электрической энергии и является причиной различных аварийных и нештатных ситуаций, создает угрозу поражения электрическим током обслуживающего персонала.

Сегодня в мире ведутся исследования, направленные на улучшение энергетических показателей качества преобразования электрической энергии в СГФ. Среди прочих к ним относятся коэффициент гармоник выходного тока системы генерирования, а также коэффициент полезного действия

полупроводникового преобразователя, характеризующие энергетическую эффективность СГФ. Кроме того, ведутся работы, направленные на улучшение технических показателей СГФ, в первую очередь, связанные со снижением массогабаритных показателей. Эти работы, в основном, связаны с исследованием бестрансформаторных СГФ.

Развитием и проработкой различных аспектов устройств силовой электроники и систем генерирования электрической энергии в разное время занимались такие видные отечественные и зарубежные ученые как С.А. Харитонов, Г.С. Зиновьев, С.В. Брованов, Е.А. Подьяков, Ю.К. Розанов, Р.Т. Шрейнер, А.А. Шавелкин, Д.И. Панфилов, Б.Ф. Симонов, Д. Винников, Е.Е. Чаплыгин, М.А. Дыбко, *A. Nabaе, L. G. Franquelo, H. Akagi, D. Holmes, E. Gubia, F. Blaabjerg, T. Lipo* и др.

Исследованию бестрансформаторных СГФ на сегодняшний день уделяется большое внимание. Однако уровень теоретических и экспериментальных исследований в части улучшения энергетической эффективности СГФ, а также развития методик расчета показателей качества преобразования электрической энергии, способов и алгоритмов подавления синфазного тока утечки не удовлетворяет современному тренду развития систем генерирования с использованием возобновляемых источников энергии. На этом основании можно сделать вывод о том, что диссертационная работа на тему «Система генерирования электрической энергии на базе солнечных батарей и полупроводникового преобразователя» является актуальной.

Цель диссертационной работы состоит в решении проблемы улучшения энергетической эффективности и технических показателей бестрансформаторных систем генерирования электрической энергии на базе фотоэлектрических модулей и многоуровневых полупроводниковых преобразователей.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Синтез полупроводникового преобразователя для системы генерирования с возможностью подавления синфазного тока утечки.
2. Разработка алгоритма векторной ШИМ для многоуровневого полупроводникового преобразователя в составе бестрансформаторной СГФ, позволяющего подавить синфазный ток утечки.
3. Разработка математических моделей предназначенных для расчета и анализа токов и напряжений в СГФ на основе многоуровневого полупроводникового преобразователя.
4. Проведение экспериментальных исследований для верификации теоретически полученных результатов.

Методы исследований.

В работе для решения поставленных задач использовались преобразования Фурье, теория обобщенного вектора, метод гармонического анализа, метод переключающих функций, методы численного и имитационного моделирования, элементы линейной алгебры.

Достоверность результатов работы.

Достоверность полученных в данной работе теоретических результатов, методов расчета и анализа подтверждается сопоставлением энергетических показателей, параметров и характеристик, полученных непосредственно путем расчета и экспериментальным макетированием, с получением адекватных результатов путем проведения имитационного моделирования с помощью пакета программного обеспечения *PSIM*.

Научная значимость и новизна основных результатов диссертационной работы заключается в следующем:

1. Синтезирована и запатентована схема однофазного пятиуровневого полупроводникового преобразователя с возможностью подавления синфазного тока утечки в составе бестрансформаторной системы генерирования электрической энергии на базе фотоэлектрических модулей.
2. Разработан алгоритм векторной ШИМ для синтезированного пятиуровневого полупроводникового преобразователя, позволяющий осуществить подавление синфазного тока утечки в бестрансформаторной СГФ.
3. Предложена методика расчета коэффициента полезного действия многоуровневых полупроводниковых преобразователей на *MOSFET*-транзисторах.
4. Установлены и исследованы энергетические показатели качества преобразования электрической энергии в бестрансформаторной СГФ на базе однофазного пятиуровневого полупроводникового преобразователя.

Положения, выносимые на защиту:

1. Бестрансформаторная система генерирования электрической энергии с улучшенными энергетическими и техническими показателями качества преобразования электрической энергии, с возможностью подавления синфазного тока.
2. Алгоритм векторной ШИМ для управления предложенным однофазным пятиуровневым полупроводниковым преобразователем, направленный на подавление синфазного тока утечки в бестрансформаторной системе генерирования электрической энергии.
3. Алгоритмы векторной ШИМ для управления трехфазными многоуровневыми полупроводниковыми преобразователями, направленные на подавление синфазного тока утечки в бестрансформаторной системе генерирования электрической энергии.
4. Результаты расчета энергетических показателей качества преобразования электрической энергии пятиуровневого полупроводникового преобразователя с подавлением синфазного тока утечки.

Практическая ценность работы.

1. Предложены алгоритмические и схемотехнические решения по подавлению паразитного синфазного тока утечки в системе генерирования электрической энергии на базе солнечных батарей и многоуровневых полупроводниковых преобразователей. Предложенные решения позволяют повысить энергетическую эффективность бестрансформаторных СГФ,

снизить стоимостные и массогабаритные показатели, повысить надежность и электробезопасность.

2. Полученные теоретические и практические результаты используются в учебном процессе при подготовке инженеров, магистрантов и аспирантов в области энергетической электроники.

Личный вклад автора.

Постановка цели, формирование задач выполняемых в ходе работы, а также анализ результатов выполнялись автором совместно с научным руководителем Бровановым С.В. Автором лично получены теоретические и практические результаты работы, а также выполнены экспериментальные исследования.

Реализация результатов работы.

Основные научные положения диссертационной работы, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований были использованы в НИР, проводимых для предприятия ООО «СПТ», а также в образовательном процессе на кафедре электроники и электротехники НГТУ.

Связь диссертационных исследований с научно-техническими программами, проектами и грантами.

Исследования по диссертационной работе выполнялись в рамках следующих программ:

1. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2012 годы». Научно исследовательские работы по лоту 2011-1.6-516-015, «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области создания эффективных накопителей электрической энергии для нужд централизованной и автономной энергетики» по теме: «Разработка и создание эффективных накопителей электрической энергии на базе многоуровневых полупроводниковых преобразователей и аккумуляторных батарей». Государственный контракт №16.516.11.6035 от 21 апреля 2011 г.
2. Проект высокотехнологического производства, утвержденный постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2015 года № 218 «Создание высокотехнологического производства систем бесперебойного питания и накопления электрической энергии» шифр «2015-218-07-33». Договор № 02.П25.31.0194 от 27 апреля 2016 года.
3. Проект N 14.577.21.0198, уникальный идентификатор ПНИЭР – RFMEFI57715X0198 на тему: «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно–технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы».
4. Грант РФФИ 17-48-543169 от 04.07.2017 «Накопитель электрической энергии с возможностью компенсации неактивной мощности для повышения энергетической эффективности распределительных электросетей и электрического транспорта».

Апробация работы.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных научных конференциях:

International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering, «SIBIRCON»–2010; Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации», НТИ–2011; Международной научной студенческой конференции «МНСК»–2015; IEEE UROCON Conference 2015, IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC) 2016, IEEE EDM-18 в 2017, IEEE EDM-19 в 2018.

Публикации.

По теме диссертационной работы было опубликовано 13 работ, включая 5 в журналах из перечня ВАК, а также 5 работ, входящих в международные системы цитирования (*Scopus, WebofScience*). Так же автором получено четыре патента на изобретения и полезную модель.

Структура диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 190 наименований, списка сокращений и условных обозначений и приложений, содержит 126 рисунков, 26 таблиц. Общий объем работы составляет 278 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность решаемой проблемы в рамках диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, научная значимость и новизна, практическая ценность полученных результатов, а также положения, выносимые на защиту, приведена структура диссертации.

В первой главе представлен аналитический обзор узлов бестрансформаторной системы генерирования электрической энергии, у которой в качестве первичного источника питания выступают солнечные фотоэлектрические модули.

Приводится краткий обзор типов солнечных фотоэлектрических модулей, аккумуляторов, *DC/DC* и *DC/AC* полупроводниковых преобразователей (ПП) в составе СГФ. Отмечено преимущество применения многоуровневых полупроводниковых *DC/AC* преобразователей. Также представлен анализ способов управления и алгоритмов ШИМ данными полупроводниковыми преобразователями в составе систем генерирования электрической энергии. Обозначен тот факт, что в настоящее время широкое распространение получают алгоритмы ШИМ, построенные на основе векторной широтно-импульсной модуляции.

Показана тенденция развития СГФ с учетом снижения стоимости на основные ее узлы. Представлен обзор областей применения СГФ. Объективный анализ систем генерирования свидетельствует о том, что на сегодняшний день подавляющее большинство СГФ работают на электрическую сеть (Рисунок 1).

На основании выполненного аналитического обзора, были выявлены проблемы, связанные с СГФ, среди которых снижение массогабаритных показателей, подавление синфазного тока утечки, повышение энергетической эффективности СГФ.

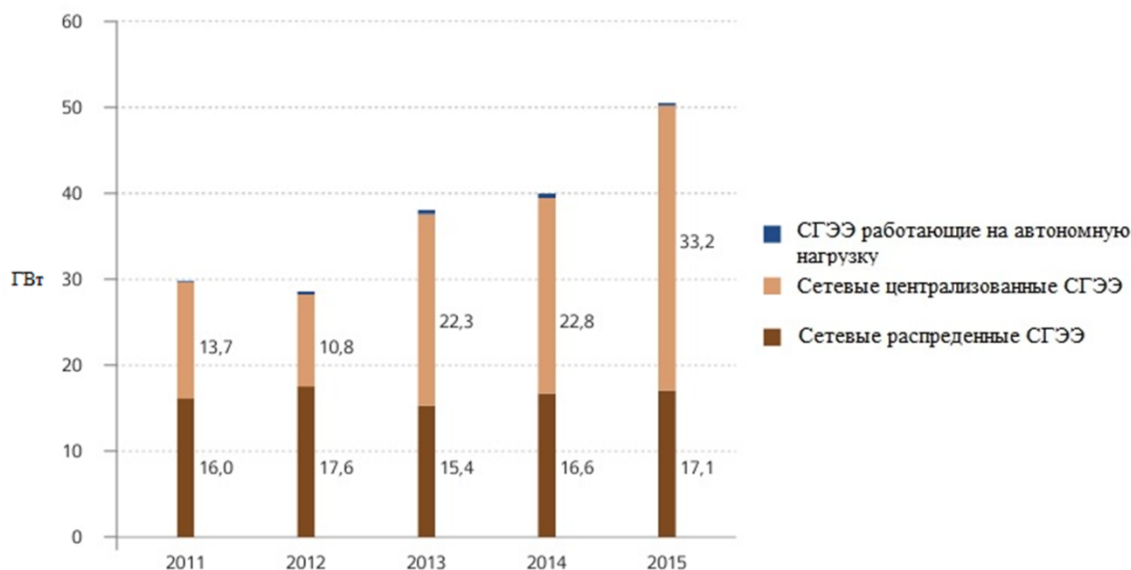


Рисунок 1 – Распределения СГФ

Во второй главе произведен анализ причин возникновения синфазного тока утечки и способов его снижения. Рассмотрены параметры и факторы, влияющие на величину синфазного тока утечки.

На Рисунке 2 представлена схема бестрансформаторной СГФ, имеющая в своем составе многоуровневый полупроводниковый преобразователь.

Было показано, что причиной возникновения синфазного тока утечки в бестрансформаторной СГФ является наличие на выходных зажимах многоуровневого полупроводникового преобразователя «1» и «2» синфазного напряжения.

В общем виде синфазный ток утечки можно определить как:

$$\sum_{n=0}^{\infty} \dot{I}_{\text{син}(n)} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\dot{U}_{\text{син}(n)}}{\frac{1}{j\omega_n C_{\Pi}} + X_{L_{12}} + \frac{Z_{\Pi}}{j\omega_n 2C_{\Phi} Z_{\Pi} + 1}}, \quad (1)$$

где $\dot{U}_{\text{син}(n)}$ – синфазное напряжение n -й гармоники, $\omega_n = 2\pi fn$ – угловая частота n -й гармоники, f – частота ШИМ, C_{Π} – эквивалентная паразитная емкость солнечного фотоэлектрического модуля (СФМ), в среднем ее величина оценивается из расчета 100 нФ на 1 кВт мощности СФМ, Z_{Π} – комплексное сопротивление контура утечки, C_{Φ} – емкость ЭМС фильтра относительно линии заземления, $X_{L_{12}}$ – эквивалентное реактивное сопротивление выходных дросселей.

Как видно из соотношения (1), синфазный ток утечки имеет полигармонический характер с содержанием различных частот, что продиктовано спектральным составом синфазного напряжения. Очевидно, что при $f = 0$ синфазное напряжение приобретает характер постоянного сигнала, что при емкостном характере контура протекания синфазного тока утечки обеспечивает значение СТУ, равное нулю.

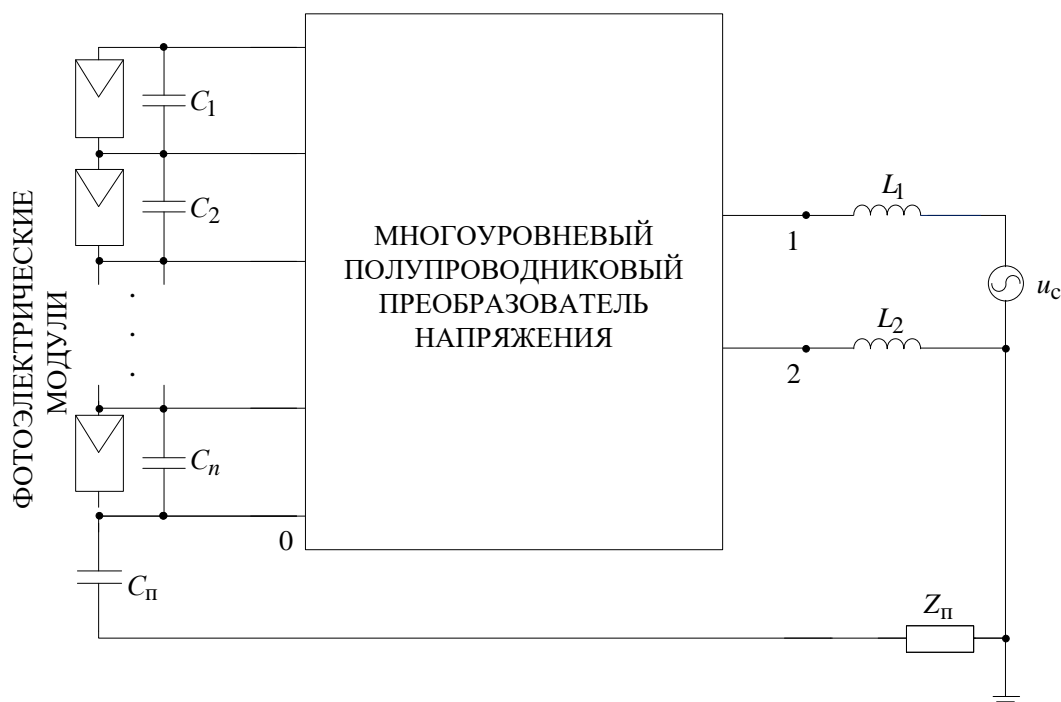


Рисунок 2 – Бестрансформаторная СГФ

Было отмечено, что на практике наибольшее распространение получили преобразователи, формирующие трехуровневое выходное напряжение, по ряду причин, наиболее важными из которых являются улучшение качества выходного напряжения, снижение параметров реактивных элементов фильтров, возможность снижения синфазного напряжения.

В дальнейшем в данной работе предложено решение, которое позволяет подавить СТУ на основе выполнения требования по частоте синфазного напряжения $u_{\text{син}}$, которая должна принимать значение $f = 0$. Для этого был синтезирован многоуровневый полупроводниковый преобразователь в составе СГФ, а также алгоритм векторной ШИМ для управления данным преобразователем, позволяющий формировать с улучшенным качеством трехуровневое выходное напряжение.

Синтез преобразователя основывался на выполнении следующих условий:

1) На всем периоде синтеза задающего вектора \vec{V}^* для любого такта ШИМ и при заданной последовательности комбинации состояния ключей (КСК) значения дифференциального выходного напряжения должны соответствовать

$$u_{\text{диф}} \in \left\{ U_{DC}; \frac{U_{DC}}{2}; 0; -\frac{U_{DC}}{2}; -U_{DC} \right\};$$

2) напряжения, формирующиеся на зажимах «1» и «2» относительно шины «0» и характеризующие внутренние ЭДС преобразователя, должны изменяться в пределах $0 \leq u_{10} \leq U_{DC}$, $0 \leq u_{20} \leq U_{DC}$.

Так как напряжения $u_{\text{син}}$ и $u_{\text{диф}}$ можно определить через напряжения u_{10} и u_{20} следующим образом:

$$u_{\text{син}} = \frac{u_{10} + u_{20}}{2}, \quad u_{\text{диф}} = u_{10} - u_{20}, \quad (2)$$

то на основании (2) были записаны системы линейных уравнений (Таблица 1), позволяющие определить напряжения u_{10} и u_{20} , а также соответствующие им КСК, при которых обеспечивалось бы выполнение вышеприведенных условий.

Было показано, что этим условиям удовлетворяют только решения для пяти систем линейных уравнений, представленных в таблице 1.

Таблица 1 – Системы линейных уравнений, уровни напряжений $u_{\text{син}}$, $u_{\text{диф}}$, u_{10} , u_{20} и соответствующие им КСК

Система уравнений	$\begin{cases} \frac{u_{10} + u_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ u_{10} - u_{20} = U_{DC} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{u_{10} + u_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ u_{10} - u_{20} = \frac{U_{DC}}{2} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{u_{10} + u_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ u_{10} - u_{20} = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{u_{10} + u_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ u_{10} - u_{20} = \frac{-U_{DC}}{2} \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{u_{10} + u_{20}}{2} = \frac{U_{DC}}{2} \\ u_{10} - u_{20} = -U_{DC} \end{cases}$
$u_{\text{син}}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{2}$
$u_{\text{диф}}$	U_{DC}	$\frac{U_{DC}}{2}$	0	$-\frac{U_{DC}}{2}$	$-U_{DC}$
u_{10}	U_{DC}	$\frac{3U_{DC}}{4}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{U_{DC}}{4}$	0
u_{20}	0	$\frac{U_{DC}}{4}$	$\frac{U_{DC}}{2}$	$\frac{3U_{DC}}{4}$	U_{DC}
КСК	(4;0)	(3;1)	(2;2)	(1;3)	(0;4)

В результате решения систем линейных уравнений (Таблица 1) были получены значения напряжений u_{10} и u_{20} , согласно которым определилась конфигурация звена постоянного тока полупроводникового преобразователя (четыре уровня напряжений) и последовательность комбинаций состояний ключей. На основании полученных комбинаций состояний ключей было задано необходимое количество двунаправленных ключей, позволяющих осуществить необходимую коммутацию уровней напряжений, и предложена схема преобразовательного устройства (Рисунок 3) для бестрансформаторной системы генерирования, обеспечивающая подавление СТУ, которая характеризуется четырьмя уровнями напряжения звена постоянного тока, а также наличием дополнительных двунаправленных ключей $SA_1 - SA_6$.

Автором была предложена последовательность КСК и алгоритм векторной ШИМ, удовлетворяющие условию формирования трехуровневого выходного напряжения СГФ с соответствующими напряжениями $u_{\text{диф}}$, $u_{\text{син}}$ и возможностью подавления синфазного тока утечки.

Векторная диаграмма, отражающая КСК и соответствующие им образующие векторы, используемые для формирования $u_{\text{син}}$ и $u_{\text{диф}}$ при синтезе задающего вектора \bar{V}^* , для предложенной схемы представлена на Рисунке 4. Здесь векторная диаграмма разделена на восемь сегментов, через которые \bar{V}^* проходит поочередно. Границы между сегментами образованы перпендикулярами, проходящими через концы векторов $\bar{V}0$, $\bar{V}1$, $\bar{V}3$.

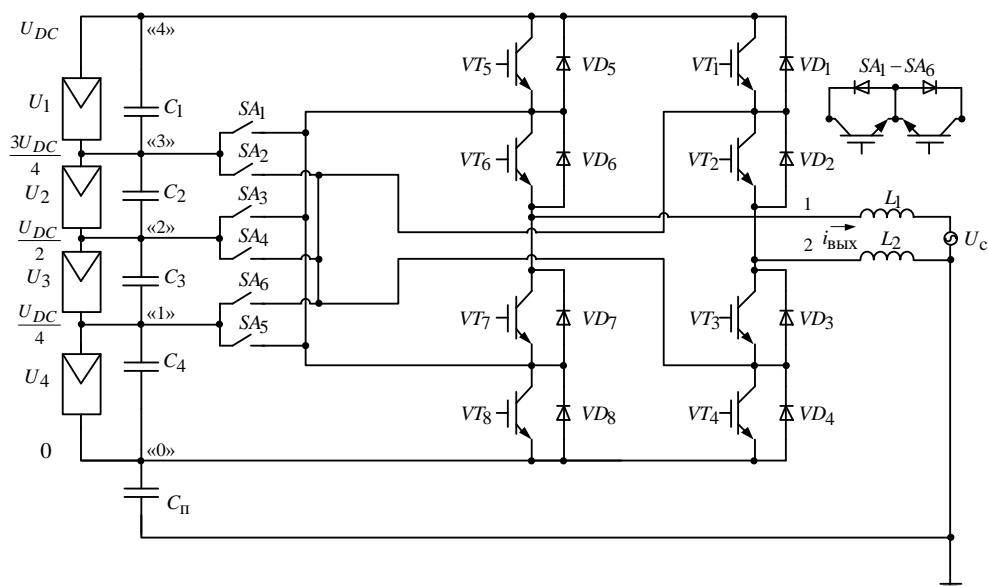


Рисунок 3 – Схема преобразователя с подавлением синфазного тока утечки

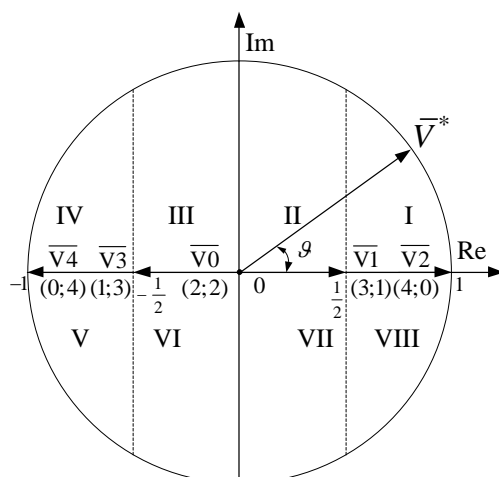


Рисунок 4 – Векторная диаграмма образующих векторов для ПП

На Рисунке 5 представлены временные диаграммы работы предложенной схемы, отражающие формирование напряжений u_{10} , u_{20} , $u_{\text{син}}$ и моменты переключения КСК. Для упрощения визуализации не отражены высокочастотные коммутации ШИМ.

Из Рисунка 5 видно, что напряжение $u_{\text{син}}$ имеет форму постоянного сигнала, что соответствует условию $f = 0$, а, следовательно, синфазный ток равен нулю.

В аналитическом обзоре диссертации автором было отмечено, что широкое применение получают трехфазные бестрансформаторные системы генерирования электрической энергии на базе фотоэлектрических модулей.

В результате проведенного анализа было выявлено, что существующие алгоритмические решения для управления трехфазными многоуровневыми полупроводниковыми преобразователями в составе бестрансформаторных систем

генерирования электрической энергии не обладают возможностью подавления СТУ. В этой связи, часть диссертационной работы была посвящена разработке алгоритмов ШИМ для подавления синфазного тока утечки в СГФ на базе трехфазных многоуровневых полупроводниковых преобразователей.

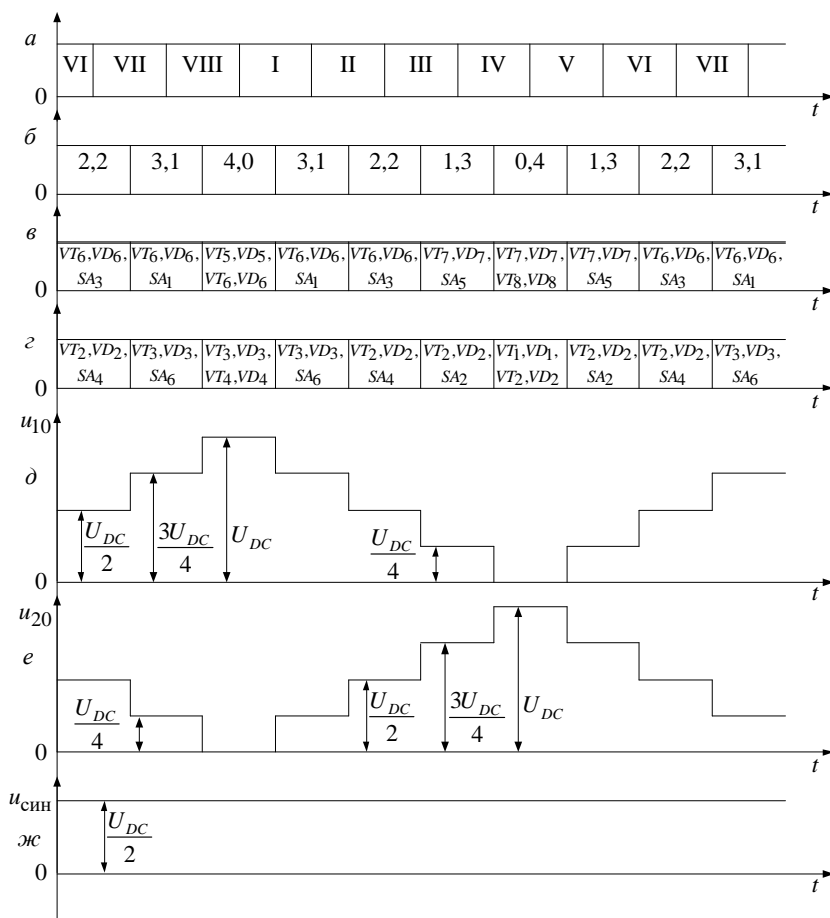


Рисунок 5 – Временные диаграммы: а) – номер сегмента; б) – КСК; в), г) – последовательность коммутации ключей преобразователя; д) – u_{10} ; е) – u_{20} ; ж) – $u_{\text{син}}$

Так, в работе предложен алгоритм ШИМ, обеспечивающий устранение синфазного тока утечки для схем трехфазных трех- и пятиуровневых преобразователей. Данный алгоритм условно был назван «селективным». Принцип реализации «селективного» алгоритма векторной ШИМ заключается в том, что при синтезе задающего вектора \vec{V}^* используются только те комбинации состояний ключей, при которых на каждом такте ШИМ значения синфазного напряжения равны между собой, обеспечивая при этом синфазное напряжение постоянной величины.

Необходимо отметить, что трехфазному трехуровневому преобразователю соответствует 27 КСК и 7 уровней синфазного напряжения, а трехфазному пятиуровневому 125 КСК и 13 уровней синфазного напряжения. На Рисунке 6 приведены векторные диаграммы трехуровневого и пятиуровневого преобразователей, соответствующие реализации «селективных» алгоритмов

векторной ШИМ, при которых значение синфазного напряжения постоянно и равно $u_{\text{син}} = \frac{U_{DC}}{2}$. Векторная диаграмма трехфазного трехуровневого преобразователя разделена на шесть треугольников, а пятиуровневого преобразователя – на двадцать четыре треугольника.

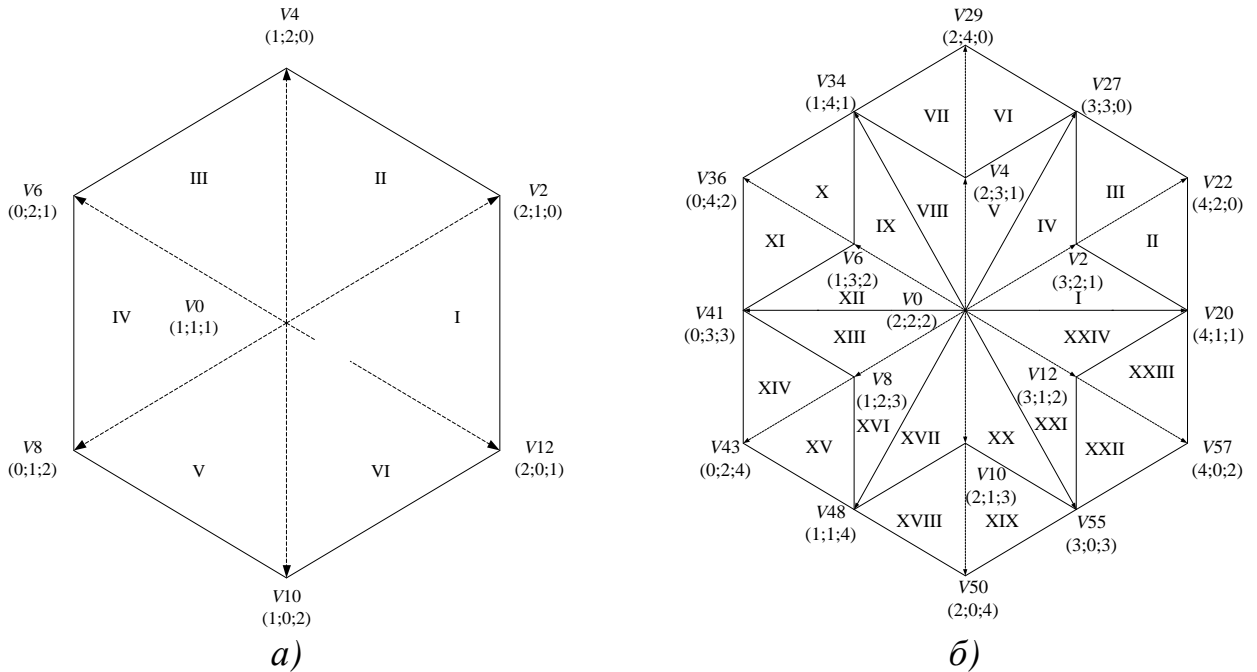


Рисунок 6 – Векторная диаграмма образующих векторов для а) – трехуровневого ПП, б) – пятиуровневого ПП, в режиме подавления СТУ

«Селективный» алгоритм векторной ШИМ может быть реализован и при использовании другого набора КСК, позволяющего сформировать другие значения $u_{\text{син}} = \text{const}$. Однако, на Рисунке 6 представлен вариант, при котором достигается максимальная глубина модуляции $M = 0,75$.

В третьей главе представлен расчет энергетических показателей качества преобразования электрической энергии СГФ, таких как спектральный состав и коэффициент гармоник выходного тока, КПД полупроводникового преобразователя. Приведен расчет таких электрических параметров как мгновенные, средние и действующие значения выходного напряжения и тока системы генерирования. Предложены математические модели, позволяющие осуществить расчет вышеописанных электрических параметров и энергетических показателей, которые базируются на использовании метода переключающих функций с учетом реализации алгоритма векторной широтно-импульсной модуляции. Процедура разработки математических моделей включает в себя следующие основные этапы:

- Расчет весовых коэффициентов для образующих векторов полупроводникового преобразователя в составе СГФ;
- Определение переключающих функций сегментов (треугольников) в соответствии с векторной диаграммой полупроводникового преобразователя;

- Задание последовательности комбинаций состояний ключей;
- Определение переключающих функций комбинаций состояния ключей;
- Расчет мгновенного, среднего и действующего значений, выходного напряжения ($u_{\text{диф}}$) и тока ($i_{\text{вых}}$) СГФ;
- Расчет спектрального состава, коэффициента гармоник выходного тока СГФ;
- Расчет потерь мощности в ключевых элементах полупроводникового преобразователя и его коэффициента полезного действия.

В соответствии с представленной процедурой ниже приведены основные соотношения математической модели для расчета синфазного и дифференциальных напряжений:

$$u_{10} = \sum_k u_{10k}, \quad (3)$$

$$u_{20} = \sum_k u_{20k}, \quad (4)$$

где u_{10k} и u_{20k} – напряжения, формирующиеся на зажимах «1» и «2» относительно шины «0» при прохождении задающего вектора через k -й сегмент. Данные напряжения определяются следующим образом:

$$u_{10k} = \sum_k F_k \cdot \sum_s (F_s \cdot U_{1N}), \quad (5)$$

$$u_{20k} = \sum_k F_k \cdot \sum_s (F_s \cdot U_{2N}), \quad (6)$$

где U_{1N} , U_{2N} – N -й уровень напряжения звена постоянного тока (ЗПТ) преобразователя для соответствующей КСК, F_k – переключающая функция k -го сегмента, F_s – переключающая функция КСК.

F_k и F_s определяются следующим образом:

$$F_k = \frac{\psi_k}{2 \cdot \pi} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\psi_k}{2}\right)}{\pi \cdot n} \cdot \cos\left(n \left(\vartheta - \left(\frac{\psi_k}{2}\right)\right)\right), \quad (7)$$

$$F_s = \tau_{ik}(\vartheta) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\tau_{ik}(\vartheta)}{2}\right)}{\pi \cdot n} \cdot \cos\left(n \left(A \cdot \vartheta - \left(\frac{\tau_{ik}(\vartheta)}{2}\right)\right)\right), \quad (8)$$

где $\vartheta = 2\pi f_1 t$ – угловая частота напряжения сети, ψ_k – угол, определяющий границы k -го сегмента, τ_{ik} – весовой коэффициент отвечающей за длительность коммутации i -го образующего вектора в k -м сегменте, A – кратность частоты ШИМ, отнесенной к частоте первой гармоники выходного напряжения СГФ.

По аналогии в диссертации были записаны соотношения математических моделей для расчета других параметров схемы.

Далее в главе проведено сравнение двух режимов работы СГФ, имеющей в своем составе разработанный автором однофазный пятиуровневый

полупроводниковый преобразователь. 1-й режим – режим подавления СТУ; 2-й режим – режим без подавления СТУ.

Сравнения проводились по такому энергетическому показателю качества преобразования электрической энергии как коэффициент гармоник выходного тока ($K_{г.т}$). Получены зависимости $K_{г.т}$ от глубины модуляции M и величины паразитной емкости фотоэлектрического модуля $C_{п}$ (Рисунок 7), рассчитанные для 1-го и 2-го режимов. Из Рисунка 7 видно, что коэффициент гармоник выходного тока СГФ инвариантен к величине паразитной емкости для режима подавления СТУ. Для режима без подавления отмечено существенное влияние СТУ на величину $K_{г.т}$.

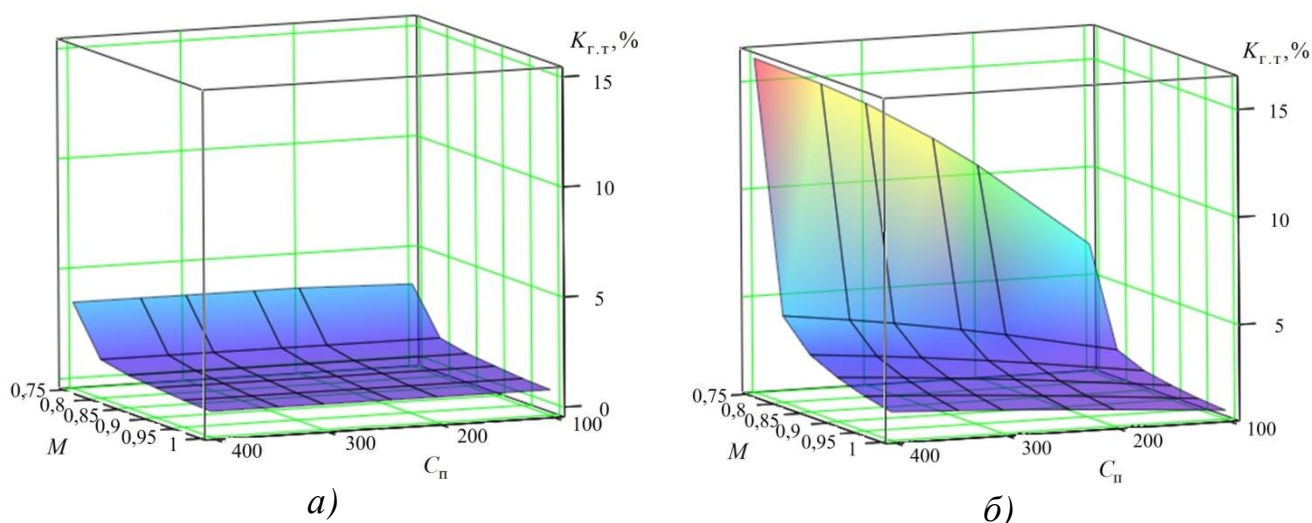


Рисунок 7 – Коэффициент гармоник выходного тока
а) – 1-й режим, б) – 2-й режим

Также в третьей главе был проведен расчет коэффициента полезного действия СГФ. Следует отметить, что поскольку в анализируемой структуре системы генерирования электрической энергии не содержится трансформатор, а потери в конденсаторах звена постоянного тока ПП пренебрежимо малы, то коэффициент полезного действия СГФ, в основном, будет определяться коэффициентом полезного действия полупроводникового преобразователя. В этой связи был произведен расчет КПД (η) однофазного пятиуровневого полупроводникового преобразователя на *MOSFET*-ключах при векторном алгоритме ШИМ для 1-го и 2-го режимов работы ПП. Для этого была предложена методика расчета динамических потерь мощности в силовых полупроводниковых преобразователях, выполненных на *MOSFET*-транзисторах при использовании алгоритма векторной ШИМ. На Рисунке 8 приведены зависимости КПД бестрансформаторной системы генерирования от кратности частот A и величины паразитной емкости фотоэлектрического модуля $C_{п}$ для 1-го и 2-го режимов работы.

Из рисунка видно, что для 1-го режима работы преобразователя η не зависит от величины C_{II} . Для 2-го режима происходит существенное снижение величины η в диапазоне изменения C_{II} от 100 до 400 нФ.

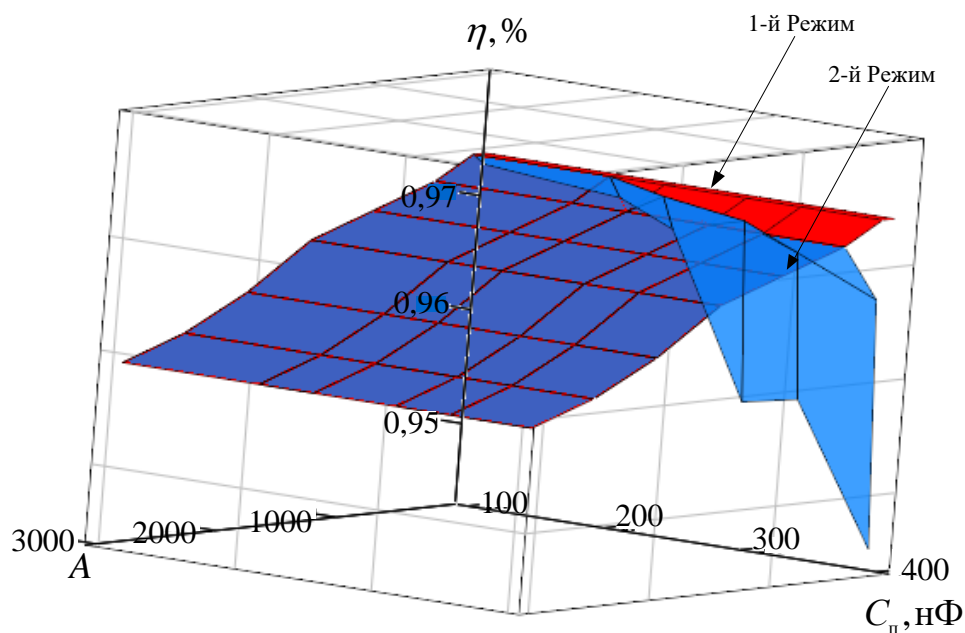


Рисунок 8 – Коэффициент полезного действия СГФ при $M = 0,886$

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям. Цель проведенных исследований заключалась в верификации возможностей подавления синфазного тока утечки при использовании предложенного полупроводникового преобразователя и алгоритма векторной ШИМ в структуре бестрансформаторной СГФ, а также адекватности разработанных математических моделей.

В этой связи, был собран экспериментальный образец бестрансформаторной СГФ на базе предложенного автором однофазного пятиуровневого полупроводникового преобразователя (Рисунок 9). Для управления данным преобразователем была спроектирована система управления на микропроцессорном модуле *STM32F4 DISCOVERY*, в которой был реализован алгоритм векторной ШИМ. Для создания гальванически развязанного напряжения на каждом драйвере транзисторов был изготовлен соответствующий источник питания на основе стандартной схемы полумостового инвертора. В эксперименте солнечные фотоэлектрические модули были эквивалентированы источниками постоянного напряжения (*MASTECH NY3003D-3*), а паразитный контур – резистивно-емкостной цепочкой.

Для подтверждения достоверности теоретически полученных результатов проводились экспериментальные исследования системы генерирования в 1-ом и 2-ом режимах работы ПП.

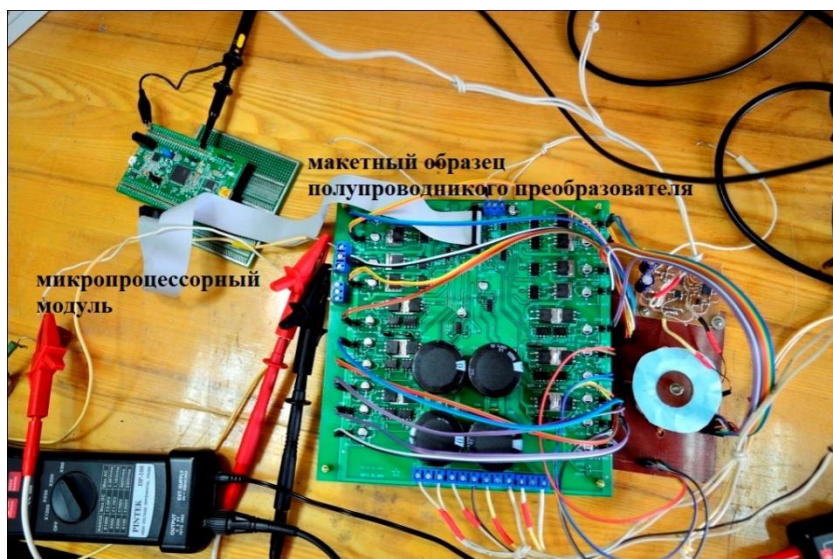
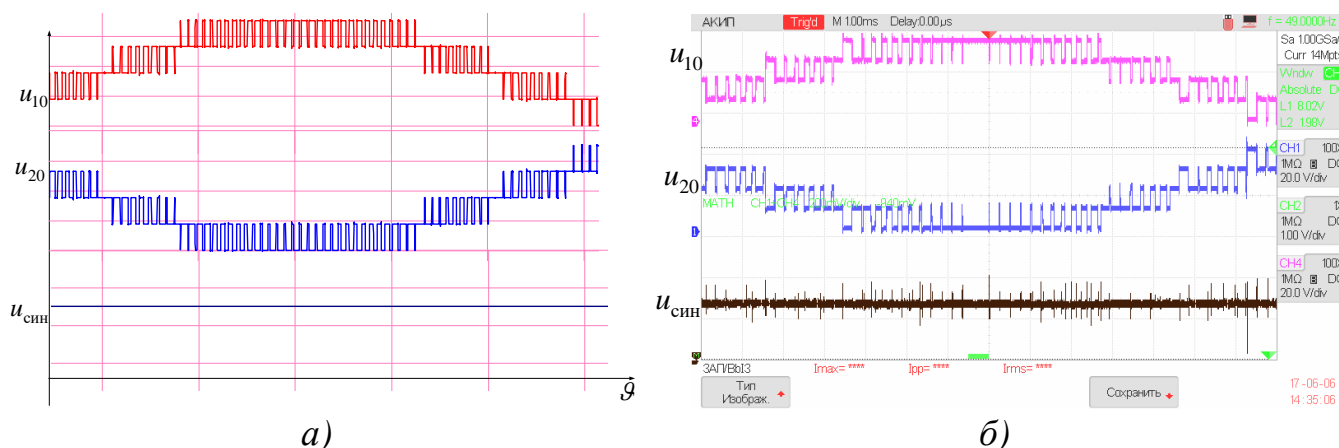


Рисунок 9 – Экспериментальная установка

В результате эксперимента было показано, что формирующееся на выходных зажимах полупроводникового преобразователя синфазное напряжение в режиме подавления СТУ имеет характер постоянного сигнала ($f = 0$) (Рисунок 10) при использовании предложенного алгоритма векторной ШИМ. В режиме без подавления СТУ синфазное напряжение имеет полигармонический характер (на рисунке не представлен).

Рисунок 10 – Эпюры напряжений u_{10} , u_{20} , и $u_{\text{син}}$ в 1-м режиме.

a) – математическое моделирование, *б)* – эксперимент

Следует отметить, что разработанные математические модели подтвердили свою адекватность. Сравнивались действующие значения синфазного тока утечки, рассчитанные с помощью математических моделей и измеренные экспериментальным путем, при этом величина погрешности лежит в пределах не более 10 %.

Были произведены оценки массогабаритных показателей СГФ. Показано, что удельные массогабаритные показатели бестрансформаторной СГФ на базе трехфазного трехуровневого полупроводникового преобразователя на 16 % ниже,

чем у такой же системы генерирования, но использующей трансформаторную развязку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнены комплексные исследования систем генерирования электрической энергии на базе многоуровневых полупроводниковых преобразователей, где в качестве первичного источника питания выступают солнечные фотоэлектрические модули. Исследования направлены на повышение энергетической эффективности данных систем генерирования.

Основные результаты и выводы, полученные в диссертационной работе:

1. Предложена структура бестрансформаторной системы генерирования электрической энергии на базе однофазного пятиуровневого полупроводникового преобразователя с возможностью подавления синфазного тока утечки.
2. Разработан алгоритм векторной ШИМ для однофазного многоуровневого полупроводникового преобразователя, позволяющий осуществить подавление синфазного тока утечки в бестрансформаторной системе генерирования электрической энергии.
3. Разработаны математические модели, предназначенные для расчета энергетических характеристик бестрансформаторной СГФ.
4. Предложена методика расчета динамических потерь мощности в силовых полупроводниковых преобразователях, выполненных на *MOSFET*-транзисторах при использовании алгоритма векторной ШИМ.
5. Проведены экспериментальные исследования, подтверждающие возможность подавления синфазного тока утечки в СГФ при использовании предложенного алгоритма векторной ШИМ, а также достоверность результатов, полученных путем математического моделирования.
6. Показано, что в диапазоне кратности частот от 0 до $A \approx 2000$ бестрансформаторная система генерирования на базе предложенного однофазного пятиуровневого полупроводникового преобразователя, в которой используется разработанный алгоритм векторной ШИМ, имеет наилучшее значение КПД по сравнению с бестрансформаторной СГФ на базе однофазного пятиуровневого преобразователя с фиксирующими диодами.
7. Показано, что удельные массогабаритные показатели бестрансформаторной СГФ на 16 % ниже, чем у такой же системы генерирования, но использующей трансформаторную развязку.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации:

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень утвержденный ВАК:

1. Брованов, С.В. Анализ скалярной и векторной широтно-импульсных модуляций для однофазных многоуровневых полупроводниковых

преобразователей с фиксирующими диодами / С.В. Брованов, Е.В. Гришанов // Доклады Академии Наук Высшей Школы Российской Федерации. – 2014. – №4(25). – С. 47–56.

2. Брованов, С.В. Анализ способов баланса напряжений на конденсаторах звена постоянного тока в однофазном трехуровневом преобразователе / С.В. Брованов, Е.В. Гришанов // Научный Вестник НГТУ. – 2015. – №1(58). – С. 213–230.

3. Брованов, С.В. Полупроводниковый преобразователь с подавлением синфазного тока утечки для систем генерирования электрической энергии на базе фотоэлектрических модулей / С.В. Брованов, Е.В. Гришанов, М.А. Дыбко // Доклады ТУСУР. – 2015. – №3(37). – С. 170–177.

4. Методика расчета динамических потерь мощности в полупроводниковых преобразователях на транзисторах типа MOSFET с векторным способом управления / М. А. Дыбко, Е. В. Гришанов, С. В. Брованов, В. Г. Токарев // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2017. – № 3 (36). – С. 52–63.

5. Математическая модель для анализа электромагнитных процессов в многозонном полупроводниковом преобразователе/А.В. Удовиченко, Е.В. Гришанов, М.А. Дыбко, С.В. Кучак, С.В. Брованов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия Энергетика.– 2018.–Т.18. – №1.–С.82–92.

Прочие опубликованные работы:

1. Брованов, С.В. Влияние небаланса напряжений конденсаторов однофазного трехуровневого преобразователя на пульсационную составляющую их токов / С.В. Брованов, Е.В. Гришанов, М.А. Дыбко // Сборник Научных Трудов НГТУ. – 2014. – №4(78).– С. 153–165.

2. Brovanov, S. A new grid-tied multilevel VSC for PV with leakage current suppression/ Brovanov S., Grishanov E., Dybko M. // International Conference on Computer as a Tool (EUROCON).– 2015. – pp. 1– 5.

3. Technical Aspects of Common-Mode Leakage Current Suppression in PV-Generation Systems / E. Grishanov , S.Brovanov , M.Dybko , S.Kharitonov , S.Leonov // Proceedings of the 2016 IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC).– 2016.– pp. 505–510.

4. A new approach for current calculation in a single-phase three-level NPC converter with space vector PWM/ S.V. Brovanov, S.A.Kharitonov, M.A.Dybko, E.V. Grishanov // Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), 2010 IEEE Region 8 International Conference.–2010.– pp. 639–644.

5. Брованов, С.В. Анализ электромагнитных процессов в однофазном трехуровневом полупроводниковом преобразователе / С.В. Брованов, Е.В. Гришанов, М.А. Дыбко // ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА.– 2012.– №2.– С. 59–60.

6. Grishanov, E.V. Aspects of common-mode leakage current suppression in single-phase PV-generation systems. / E. V. Grishanov, S.V. Brovanov, // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2017 18th International Conference of Young Specialists on.– 2017.– pp. 541–546.

7. Гришанов, Е.В. Особенности применения однофазного пятиуровневого преобразователя в системе генерирования электрической энергии на базе солнечных фотоэлектрических модулей / Е. В. Гришанов, С. В. Брованов // Наука в России: перспективные исследования и разработки: сборник материалов I Всероссийской научно-практической конференции / Под общ. ред. С.С. Чернова. – Новосибирск: Издательство ЦРНС. – 2017. – С.177–122.

8. Udovichenko, A.V. Mathematical models for analysis of electromagnetic processes in thyristor circuits of AC voltages regulators / A.V. Udovichenko, E.V. Grishanov, S.V. Brovanov, M.A. Dybko // Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2018 19th International Conference of Young Specialists on. –2018. – pp. 515– 522.

По результатам работ получены патенты:

1. Патент Российской Федерации RU 2588257 C1 от 27.06.2016 МПК H02M7/483, H02M7/527, Способ баланса напряжений на конденсаторах однофазного трехуровневого преобразователя с фиксирующими диодами / Брованов С.В., Гришанов Е.В. //; заявитель и патентообладатель Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский Государственный технический университет". – № 2015109985/07, заявл. 20.03.2015; опубл. 27.06.2016.

2. Патент Российской Федерации RU 159 218 U1 от 10.02.2016 МПК H02M 7/44, Однофазный преобразователь напряжения / Брованов С.В., Гришанов Е.В. //; заявитель и патентообладатель Федеральное Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Новосибирский Государственный технический университет". – № 2015117124/02; заявл. 05.05.2015; опубл. 10.02.2016, Бюл. № 4.

3. Патент Российской Федерации RU 2 644 397 C1 от 12.02.2018 МПК H02M 7/527, H02H 7/122, Способ подавления паразитного синфазного тока утечки в трехфазном преобразователе / Брованов С.В., Гришанов Е.В., Колесников В.А., Семягин А.С.//; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Системы Постоянного Тока". – № 2016145471; заявл. 21.11.2016; опубл. 12.02.2018, Бюл. № 5.

4. Патент Российской Федерации, Способ управления однофазным многоуровневым преобразователем в системе генерирования электрической энергии / Гришанов Е.В., Брованов С.В. // Заявка 2017120144 от 07.06.17. Получено положительное заключение и принято решение о выдаче патента 20.08.18.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса 20
Тел./факс (383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.
Заказ № 1234. Подписано в печать 18.09.2018 г.