

На правах рукописи

Рекутов

РЕКУТОВ ОЛЕГ ГЕННАДЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА ФОРМИРОВАНИЯ
ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМИТАТОРА
БАТАРЕИ СОЛНЕЧНОЙ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель

Рулевский Виктор Михайлович,
доктор технических наук, доцент,
ТУСУР

Официальные оппоненты:

Пантелеев Василий Иванович,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой
«Электротехнические комплексы и
системы» ФГАОУ ВО «Сибирский
федеральный университет»;

Титов Виталий Семенович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Вычислительной техники»
ФГБОУ ВО «Юго-Западный
государственный университет».

Ведущая организация

Акционерное общество «Научно-
производственный центр «Полюс»,
г. Томск.

Защита состоится «14» декабря 2023 г. в 15 часов 15 минут на заседании диссертационного совета 24.2.415.05, созданного на базе Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа по адресу: 634045, г. Томск, ул. Красноармейская, 146, и на официальном сайте: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/evio02zu>

Автореферат разослан «__» _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



В. В. Каранский

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степени ее разработанности.

Космические аппараты (КА) являются сложными и дорогостоящими электротехническими устройствами. Критически важным звеном КА является система электроснабжения (СЭС), обеспечивающая электроэнергией бортовую аппаратуру и оборудование. Солнечная батарея (СБ) является одним из ключевых элементов СЭС, выполняя роль первичного источника электрической энергии. От работы СБ КА зависит его эффективность и срок службы. В связи с этим встает вопрос комплексных испытаний СЭС КА с целью оценки ее соответствия техническому заданию и надежности, прежде чем КА отправится в космос.

При наземных испытаниях нецелесообразно использовать штатные СБ. Это обусловлено тем, что в зоне испытаний на земле невозможно добиться той интенсивности солнечного излучения, что и в космосе. Но даже при возможности реализации такого излучения в связи с низким КПД солнечной батареи экономически это будет крайне дорогостоящим мероприятием. Помимо этого, в процессе испытаний необходимо моделировать изменение окружающих условий, таких как изменение температуры, затенение, затмение, в различных режимах работы СБ. Решением данной проблемы является использование контрольно-испытательной системы (КИС), осуществляющей тестирование СЭС КА и состоящей из ряда электротехнических комплексов: имитатора аккумуляторной батареи, имитатора батарей солнечной (ИБС), блока имитации нагрузки. Эти комплексы позволяют в полной мере осуществить наземные испытания СЭС КА. Задачей ИБС является имитация первичного источника тока – солнечной батареи.

Условно ИБС можно считать источником тока, важной особенностью которого является высокая скорость реакции на возмущающее воздействие. Для реализации данной особенности при проектировании ИБС для космической отрасли в настоящее время превалирует использование топологии с линейным принципом работы силовых модулей (СМ) стабилизации тока и естественным образом адаптированной к ней аналоговой или комбинированной (аналого-цифровой) системы управления (СУ). При постоянно возрастающих требованиях к увеличению мощности СЭС КА становится очевидным недостаток использования СМ с линейным принципом работы в составе ИБС вследствие низкого КПД и высоких массогабаритных характеристик, что значительно затрудняет разработку ИБС повышенной мощности.

Применение ИБС с импульсным принципом работы СМ для космической отрасли находится на начальном этапе развития и, несмотря на возможность обеспечивать значительную мощность, данные ИБС имеют ряд недостатков, связанных с ограниченной точностью формирования вольт-амперной характеристики (ВАХ).

Проблематикой создания СЭС КА в нашей стране занимается достаточно много предприятий, наиболее значимые из них ПАО «РКК «Энергия» (г. Королев), АО «РКЦ «Прогресс» (г. Самара), АО «НПО Лавочкина» (г. Химки), ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева» (г. Москва) и др.

Исследования по различным способам формирования вольт-амперных характеристик имитатора батарей солнечных проводятся сотрудниками АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (г. Железногорск), АО «НПЦ «Полос» (г. Томск), АО «Авиационная электроника и коммуникационные системы» (г. Москва). Наиболее значимых результатов в нашей стране по данной тематике добился коллектив сотрудников «НИИ АЭМ ТУСУРА» (г. Томск). Среди зарубежных компаний и университетов, проводящих исследования в данном направлении, можно выделить Elgar (входит в состав корпорации АМТЕК, США), Keysight Technologies (США), Eiffage Clemessy (Швейцария), Харбинский политехнический университет (Китай).

Существенный вклад в развитие теоретических и экспериментальных исследований в области создания СЭС КА внесли как российские, так и зарубежные ученые: В.Н. Мишин, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, В.М. Рулевский, Ю.А. Шиняков, Ю.А. Шурыгин, Е.А. Мизрах, С.Б. Ткачев, Д.Н. Пойманов, Р.В. Балакирев, А.В. Шкуратов, А.В. Петровский, М.Ф. Ганзбург, С.М. Лишаев, Н.И. Мищенко, В.И. Трофименко, П.К. Шурыгин, J. Shanshan, Z. Donglai, Q. Lu, L. Mingyu, Z. Xiaofeng, G. Yu и др.

Приближение ИБС по своим характеристикам к реальной солнечной батарее определяет успешность наземных испытаний, что в свою очередь является хорошей предпосылкой для успешного выполнения космическим аппаратом своей миссии. Отсюда становятся очевидными актуальность и практическая ценность исследований способов формирования ВАХ и разработки ИБС.

Объектом исследования является имитатор батареи солнечной.

Предмет исследования: ИБС, включающий алгоритмические и схемотехнические решения.

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка и

исследование способа формирования ВАХ ИБС с использованием комплексного подхода к построению силовой части энергопреобразователя и модификации системы управления для повышения точности воспроизведения заданной ВАХ при наземных испытаниях СЭС КА.

Достижение цели обеспечивается последовательным решением следующих задач:

1. Анализ современного состояния вопросов проектирования ИБС, определение основных требований и режимов работы в составе КИС СЭС КА.

2. Обзор и сопоставление вариантов формирования ВАХ ИБС, а также предложение способа построения структуры ИБС, обеспечивающей малоинерционный режим работы, за счет формирования контуров протекания стабилизируемого тока силовой части ИБС с импульсным принципом работы, что позволяет повысить точность воспроизведения его ВАХ.

3. Разработка математической модели ИБС для исследования динамических и статических режимов работы.

4. Разработка алгоритмов управления ИБС, позволяющих синхронизировать работу его силовых контуров в зависимости от нагрузки и уменьшающих пульсации стабилизируемого тока при скачкообразном изменении нагрузки.

5. Разработка технических решений и макетного образца программно-аппаратного комплекса (ПАК) ИБС, позволяющих обеспечить точность заданной формы ВАХ ИБС.

Научная новизна работы

1. Предложена структура ИБС КА на базе модифицированной топологии понижающего преобразователя с обводным контуром, позволяющая за счет формирования непрерывного протекания тока в контуре стабилизатора тока обеспечить повышение точности воспроизведения его ВАХ на 70 % для динамического режима работы.

2. Разработана математическая модель ИБС, отличающаяся тем, что в ней учитываются паспортные данные значений трех граничных точек ВАХ солнечной батареи, в связи с чем можно сформировать приближенную статическую ВАХ данной СБ без нелинейного участка и за счет учета параметров нагрузки исследовать статические и динамические режимы работы.

3. Разработан алгоритм системы управления ИБС, позволяющий улучшить точность воспроизведения ВАХ за счет уменьшения времени реакции на возмущающие воздействия.

4. Предложена методика комплексной проверки

электрических параметров ИБС, позволяющая за счет оценки соответствия его ВАХ на участках тока и напряжения, частотных характеристик и выходной емкости, обеспечить заданный режим работы.

Практическая значимость

1. Предложена новая структурная схема ИБС, позволяющая за счет наличия обводного контура в схеме стабилизатора тока обеспечить повышение точности воспроизведения заданной ВАХ.

2. Разработаны математические модели ИБС с модифицированными СУ в пакете прикладных программ MatLab и MathCad, позволяющие исследовать статические и динамические процессы в разомкнутой и замкнутой системах при различных режимах его работы.

3. Разработана цифровая СУ ИБС, дающая возможность за счет специального программного обеспечения осуществлять быструю настройку необходимых параметров и алгоритмов работы имитатора, что значительно сокращает время и стоимость выполняемых работ при создании электротехнических комплексов на базе устройств силовой электроники.

4. Разработаны и внедрены в промышленную эксплуатацию опытные образцы одноканального ИБС мощностью 3,6 кВт, четырехканального ИБС суммарной мощностью 4,9 кВт и девятиканального ИБС суммарной мощностью 4,3 кВт.

Методы исследования. В основе теоретических методов исследования лежит теория электрических цепей и автоматического управления, методы математического моделирования и численного решения систем линейных дифференциальных уравнений. В качестве инструментальных средств использовались программные пакеты MathCad и MatLab/Simulink. Теоретические результаты подтверждены экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях макетного образца, разработанного и изготовленного в НИИ АЭМ ТУСУРа.

Положения, выносимые на защиту

1. Структура ИБС КА с модифицированной топологией понижающего преобразователя, позволяющая представить имитатор как малоинерционный источник тока и новой системой управления, позволяющей обеспечить четкий критерий перехода между участками тока и напряжения, что обеспечивает повышение точности ВАХ относительно малоинерционного ИБС предыдущего поколения.

2. Математическая модель ИБС, позволяющая за счет учета изменения параметров нагрузки исследовать статические и динамические режимы его работы.

3. Методика проектирования системы управления ИБС,

позволяющая, за счет уменьшения времени реакции на возмущающие воздействия при динамическом изменении нагрузки, уменьшить погрешность воспроизведения ВАХ ИБС.

4. Экспериментальные исследования показывают, что за счет разработанных схмотехнических и алгоритмических решений, ИБС отвечает предъявляемым требованиям. Частотные кривые импедансов соответствуют источнику тока для участка тока ВАХ и источнику напряжения для участка напряжения ВАХ. Способен имитировать паразитную емкость СБ и формировать заданную ВАХ в статическом режиме с возможным наклоном на участке тока с погрешностью не более 2 %.

Достоверность научных результатов и выводов диссертационной работы подтверждается корректным использованием научно-обоснованных методов исследований, сходимостью экспериментальных и расчетных данных, принятыми допущениями, охранными документами на результаты интеллектуальной деятельности.

Результаты, полученные при проведении экспериментальных испытаний, подтверждают справедливость научных положений и применимость предложенных методов, технических решений и выводов. Все главы диссертационной работы взаимосвязаны и являются результатом теоретических и экспериментальных исследований.

Личный вклад автора

Научные результаты, составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. Автор непосредственно участвовал в анализе условий работы ИБС для наземных испытаний СЭС КА, а также исследованиях и систематизации принципов формирования ВАХ ИБС, на основе чего сформулированы основные требования к характеристикам ИБС; предложил и разработал математические модели ИБС с различными модификациями СУ в среде MatLab/Simulink; принимал участие в разработке, настройке и испытаниях макетных образцов аппаратно-программных средств ИБС, а также осуществлял анализ полученных данных с математическим моделированием.

Реализация результатов диссертационной работы

Полученные результаты диссертационной работы использованы в виде схмотехнических и программных решений при разработке ИБС для наземных испытаний СЭС КА в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ НИИ АЭМ ТУСУРа (г. Томск), выполняемых для ряда предприятий ракетно-космической отрасли. По результатам исследований получены патенты и свидетельства на ПО. Подтверждением промышленного использования результатов диссертационной работы является наличие акта о внедрении.

Диссертационная работа подготовлена в рамках гранта

Российского фонда фундаментальных исследований (20-38-90177 Аспиранты) на тему «Исследование способа формирования вольт-амперной характеристики имитатора солнечной батареи для испытания систем электроснабжения космических аппаратов».

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Согласно формуле специальности 2.4.1 – «Теоретическая и прикладная электротехника» работа содержит теоретические и экспериментальные исследования, которые позволяют в соответствии с п. 9 проводить разработку научных основ, анализ и экспериментальные исследования процессов преобразования (выпрямления, инвертирования, импульсного, частотного и фазочастотного регулирования и т.п.) в устройствах силовой электроники, создание схем и устройств и моделей силовой электроники, исследование свойств и принципов функционирования элементов схем и устройств; в соответствии с п. 10 осуществлять математическое и схемотехническое моделирование преобразовательных устройств, оптимизацию преобразователей, их элементов и узлов.

Апробация результатов работы

Результаты диссертационного исследования обсуждались на международных и отечественных научно-технических мероприятиях: XXIV Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2019); XV Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2019); XX Всероссийской научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства» (Томск, 2020); XXVI Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2021); XVII Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2021); XXVII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР» (Томск, 2022).

Научные исследования выполнялись в рамках научно-исследовательской работы на проведение составной части опытно-конструкторских работ между НИИ АЭМ ТУСУРа и АО «РКЦ «Прогресс» «Создание оборудования программно-аппаратного комплекса имитатора батареи солнечной для проведения испытаний системы электропитания космического аппарата «Бион-М» №2» в период с 2018 по 2022 г.

Публикации. По результатам диссертационного исследования опубликовано 7 статей в изданиях, входящих в перечень периодических изданий ВАК, 5 статей в сборниках всероссийских и международных

конференций, 3 статьи в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus, получены 2 патента на изобретение, 5 патентов на полезную модель, 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертационной работы.

Диссертационная работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 125 наименований и 2 приложений. Содержит 5 таблиц и 72 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена проблематика и актуальность работы. Сформулирована цель и определены основные задачи исследования, представлены методы исследования, показана практическая ценность проведенных исследований и полученных результатов, даны сведения об апробации, научной новизне, представлены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе дается обоснование и формулировка требований, предъявляемых к ИБС на основании факторов, напрямую связанных с условиями работы имитируемой СБ и ее физической природой. Дается описание вольт-амперной характеристики ВАХ (рисунок 1) состоящей из участков тока, напряжения и нелинейного участка, которые имеют определенные наклоны относительно идеальной ВАХ. Данные наклоны определяются величинами сопротивлений $R_{\text{пар}}$ и $R_{\text{п}}$, составляющих структуру СБ. В каждой точке ВАХ наклоны можно определить через величины разниц $I_{R_{\text{пар}}}$, $U_{R_{\text{п}}}$, относительно идеальной ВАХ.

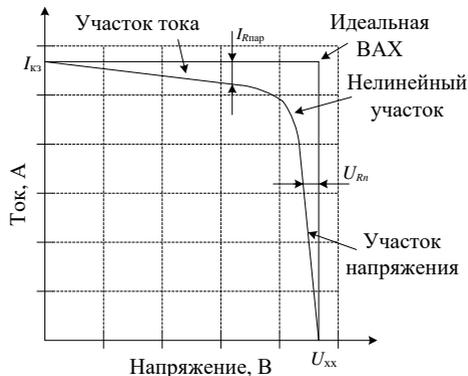


Рисунок 1 – Вольт-амперная характеристика СБ

Проводится классификация ИБС используемых как в промышленной, так и в космической отраслях и анализ каждого вида ИБС по классификационному признаку. Приводятся полученные в результате анализа выводы и предлагается альтернатива существующим подходам к способу формирования ВАХ ИБС суть которой отражается в использовании определенной топологии построения ИБС и адаптированной под эту топологию СУ. С учетом этого предлагается представлять ИБС как малоинерционный источник тока или «малоинерционный ИБС», соответствующая структура которого показана на рисунке 2.

Источники напряжений U_0 и $U_{доб}$ служат для формирования напряжения $U_{ХХ}$. МСТ, выполненный по модифицированной топологии понижающего преобразователя, с помощью ШИМ-преобразования осуществляет стабилизацию тока дросселя $L1$, именуемого также током короткого замыкания – $I_{КЗ}$, независимо от тока нагрузки I_H . Резисторы $R_{П}$ и $R_{Ш}$ предназначены для имитации соответствующих сопротивлений СБ. Отсекающий диод $VD3$ служит для формирования обводного канала.

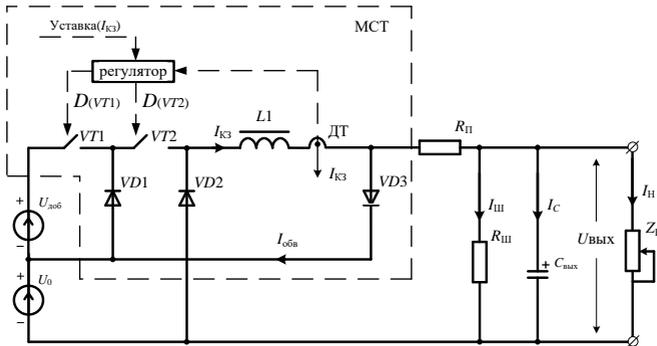


Рисунок 2 – Структурная схема малоинерционного ИБС с реализацией управления работой обводного канала только регулятором

Во второй главе приводится функциональная схема девятиканального ИБС. Описывается работа каналов ЗАРЯД/РАЗРЯД представляющих базовую часть ИБС.

Предлагается концепция, лежащая в основе проектирования ИБС в виде ряда последовательных шагов. Обоснование адекватности предложенной концепции производится сопоставлением эквивалентных схем на основе солнечного элемента и источника электроэнергии, с учетом работы на нагрузку. Реализация моделей производится в среде Matlab/Simulink. Были получены в целом одинаковые вольт-амперные и

сигналы, либо как дискретные, в результате чего были получены непрерывная и дискретная математические модели ИБС, реализованные в среде Matlab/Simulink. Необходимо отметить, что все разработанные модели ИБС дают одинаковые результаты.

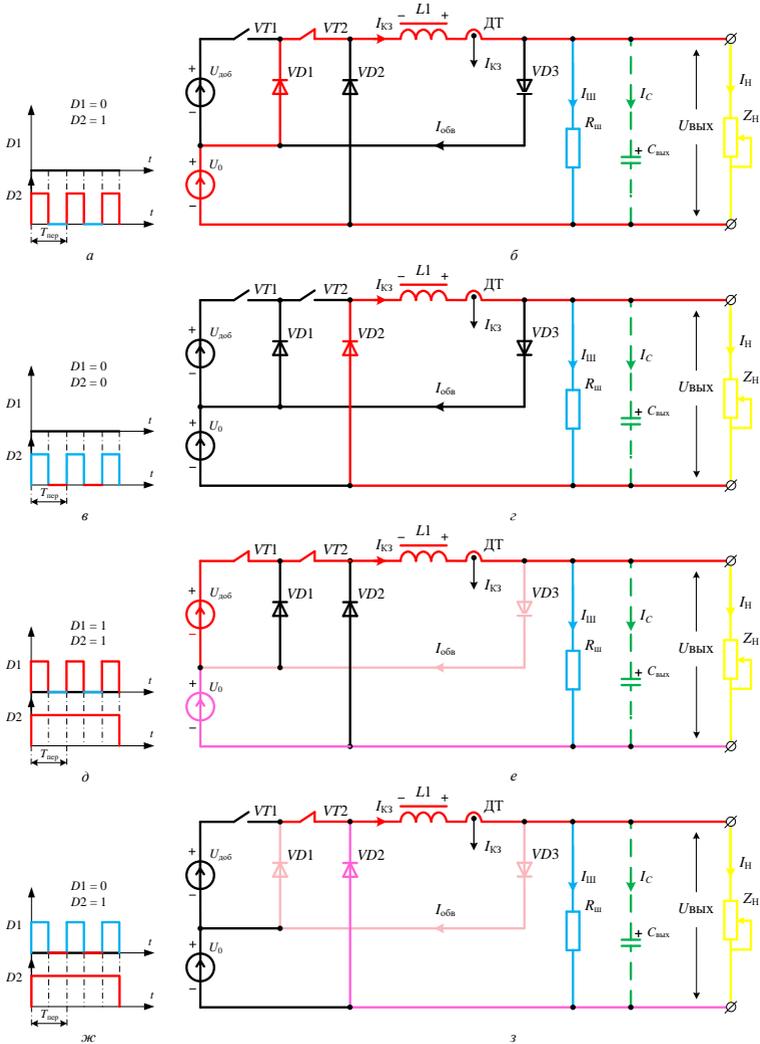


Рисунок 4 – Функциональные схемы ИБС с контурами протекания токов в зависимости от состояния ключей $VT1$ и $VT2$ (б, в, г, з) во временном интервале периода ШИМ (а, в, д, ж)

Сопоставление моделей СБ и ИБС показывает, что все ключевые точки ВАХ имитируемой СБ корректно формируются исследуемым ИБС (рисунок 5). Таким образом, результаты моделирования показывают, что математические модели ИБС в среде Matlab/Simulink на основе аналитической модели (1) могут быть использованы для исследования предложенного способа формирования ВАХ СБ и разработки соответствующего ИБС.

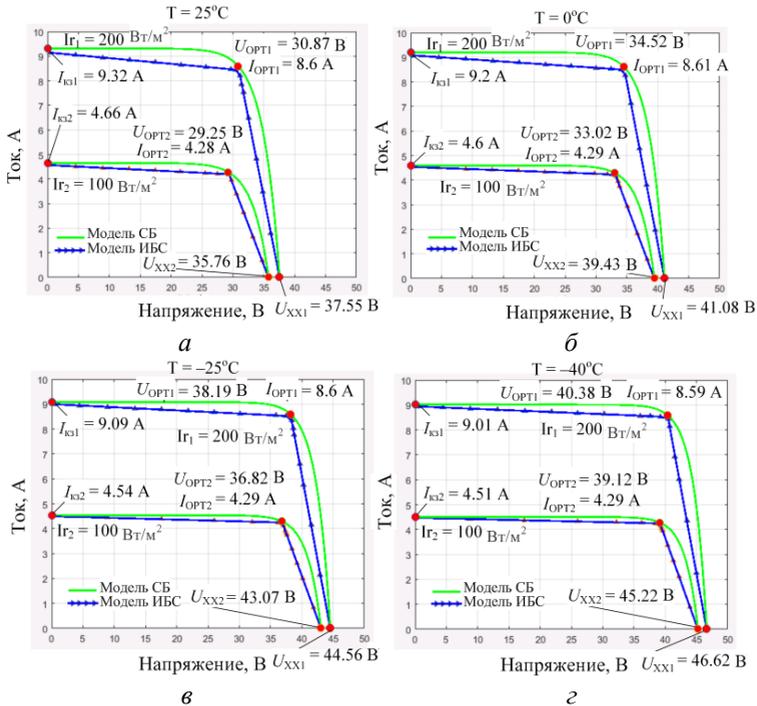


Рисунок 5 – Семейства ВАХ ИБС и СБ для различных температур окружающей среды: а – $T = 25^\circ\text{C}$; б – $T = 0^\circ\text{C}$; в – $T = -25^\circ\text{C}$; г – $T = -40^\circ\text{C}$

В третьей главе представлены модификации СУ, призванные уменьшить пульсации тока ИБС при возмущающих воздействиях изменения нагрузки и тем самым увеличить точность формирования ВАХ. Разработаны модели ИБС с соответствующими СУ в среде Matlab/Simulink и проведены опыты на аналогичных моделях натуральных образцов.

На рисунке 6 представлен алгоритм работы модификации СУ с

помощью программно-аппаратного решения введением схемы релейного регулятора (РР) с учетом условия устранения влияния помех. Алгоритм условно состоит из двух частей – работы релейного регулятора (в приоритете) и основного регулятора (ОР).

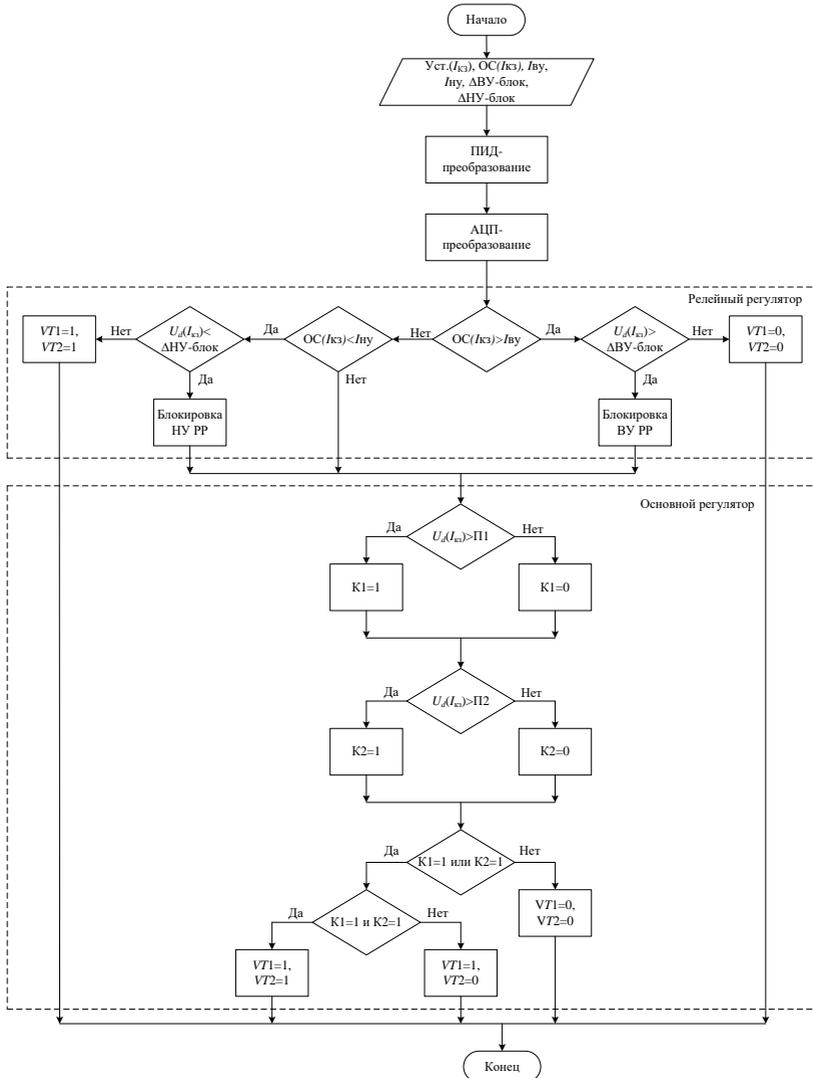


Рисунок 6 – Алгоритм работы СУ с учетом условия устранения влияния помех на работу РР

В основу алгоритма РР положено условие сравнения величины тока обратной связи $OC(I_{K3})$ с допустимыми границами вверх и вниз от стабилизируемого значения ($I_{ву}$, $I_{ну}$).

В свою очередь при возникновении данных условий происходит проверка возможности их выполнения исходя из положения рабочей точки на ВАХ в цифровой форме $U_d(I_{K3})$. Данная величина является управляющим воздействием оцифрованного значения преобразованной ПИД-регулятором ошибки регулирования при сравнении сигналов $Уст.(I_{K3})$ и $OC(I_{K3})$.

В случае вхождения значения $U_d(I_{K3})$ в диапазоны (ДВУ-блок, ДНУ-блок), работа передается основному регулятору. В противном случае формируются соответствующие состояния ключей $VT1$ и $VT2$. Ключи либо размыкаются, таким образом предотвращая нарастание тока в случае его превышения допустимой границы, либо замыкаются, форсируя нарастание тока, в случае его уменьшения от допустимой границы.

Для составной части алгоритма основного регулятора П1 и П2 – цифровые пилы для сравнения с сигналом управляющего воздействия в цифровой форме. К1 и К2 – цифровые компараторы, выходы которых принимают логические значения, определенные сочетания которых формируют коэффициенты заполнения ключей $VT1$ и $VT2$.

На рисунке 7 представлена реализация данной модификации СУ для натурального образца.

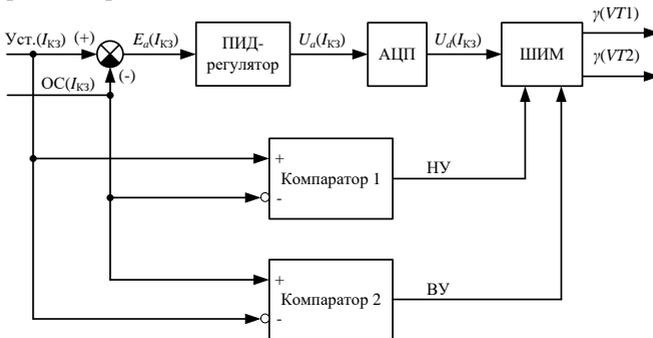


Рисунок 7 – Структурная схема СУ с модификацией РР натурального образца ИБС

Релейный регулятор работает в промежутках времени, в которых имеет место быть запаздывание отклика на возмущающее воздействие основного регулятора, обусловленного его инерционностью.

На рисунке 8 показаны сравнительные осциллограммы тока I_{K3} при работе на динамическую нагрузку с частотой 500 Гц для моделей с

оригинальной и модифицированной СУ в среде Matlab/Simulink и натурального образца. Принятые параметры ВАХ: $I_{КЗ} = 4$ А и $U_{ХХ} = 60$ В.

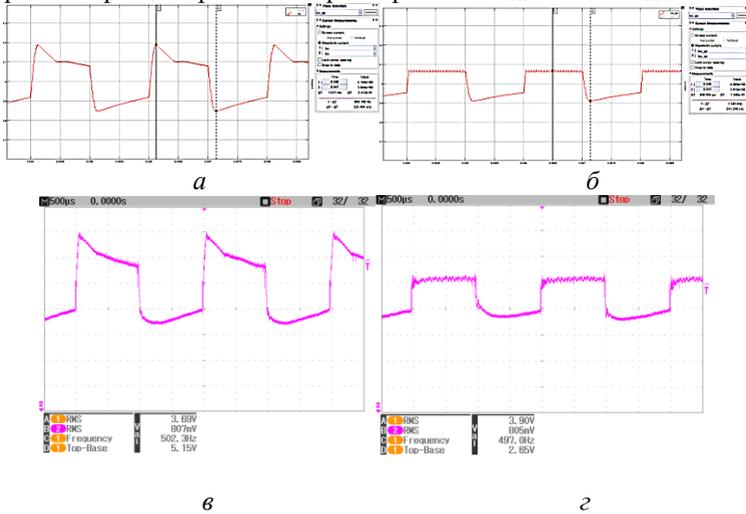


Рисунок 8 – Осциллограммы тока $I_{КЗ}$ ИБС при работе на динамическую нагрузку: *а* – модели Matlab/Simulink под управлением только ОР; *б* – модели Matlab/Simulink под совместным управлением ОР и РР; *в* – натурального образца ИБС под управлением только ОР; *г* – под совместным управлением ОР и РР

На рисунках 9, 10 показаны соответственно модель СУ в среде Matlab/Simulink и структурная схема СУ натурального образца с модификацией введения дополнительной ОС ($U_{ВЫХ}/U_{ВХ}$) отношения сигналов выходного и входного напряжений модуля стабилизатора тока, отвечающего за непосредственное формирование ВАХ ИБС.

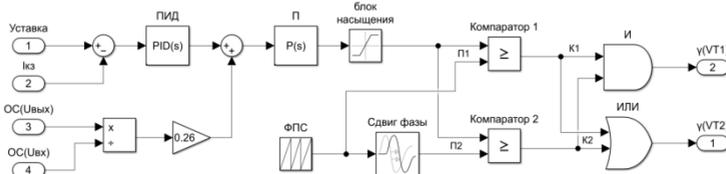


Рисунок 9 – Модель модифицированной СУ введением ОС ($U_{ВЫХ}/U_{ВХ}$) в среде Matlab/Simulink

Особенностью выходного силового модуля ИБС является его малая инерционность ввиду того, что емкость на выходе практически отсутствует. При скачкообразном изменении величины нагрузки,

напряжение выхода изменяется практически мгновенно. Таким образом, используя в качестве сигнала ОС напряжение выхода можно увеличить быстродействие СУ. Аналогичные рассуждения применимы и к сигналу входного напряжения.

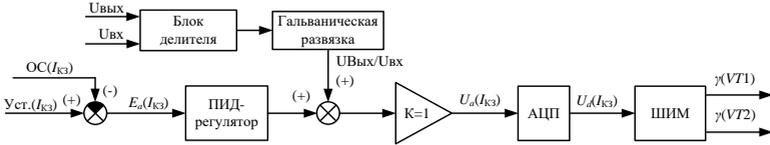


Рисунок 10 – Структурная схема СУ с модификацией дополнительной ОС ($U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$) натурального образца ИБС

Полученные в результате экспериментов осциллограммы тока I_{K3} при работе на динамическую нагрузку с частотой 50 Гц для модели в среде Matlab/Simulink и натурального образца показаны на рисунке 11. Принятые параметры ВАХ: $I_{K3} = 4$ А и $U_{XХ} = 60$ В.

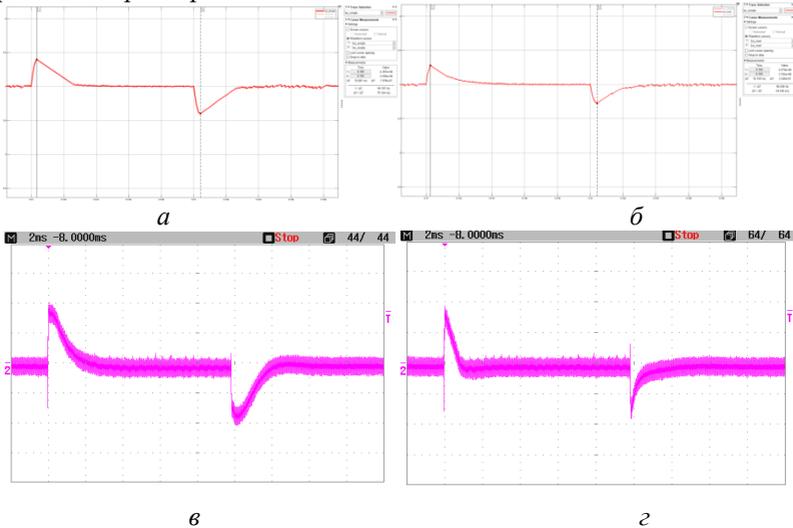
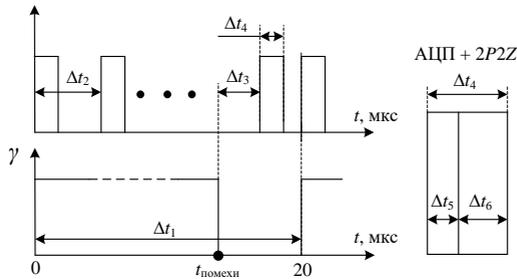


Рисунок 11 – Осциллограммы тока I_{K3} ИБС при работе на динамическую нагрузку: *а* – модели Matlab/Simulink ИБС со стандартной СУ; *б* – модели Matlab/Simulink ИБС с модифицированной СУ введением ОС ($U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$); *в* – натурального образца ИБС со стандартной СУ; *г* – натурального образца ИБС с модифицированной СУ введением ОС ($U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$)

В результате сравнения осциллограмм рисунков 8 и 11 становится очевидным влияние модификаций СУ на уменьшение

амплитуды пульсаций как в случае моделей в среде Matlab/Simulink, так и натуральных образцов.

Исследована возможность применения цифровой СУ в ИБС. Для повышения скорости работы проведена модификация алгоритма работы цифрового регулятора (рисунок 12).



Δt_1 – период ШИМ

Δt_2 – период квантования

Δt_3 – выдержка времени от начала коммутационной помехи

Δt_4 – время обработки ошибки регулирования

Δt_5 – время АЦП преобразования

Δt_6 – время 2P2Z преобразования

$t_{\text{помехи}}$ – момент времени появления коммутационной помехи

Рисунок 12 – Временная диаграмма работы цифрового регулятора за период ШИМ

На временной диаграмме показано, что для повышения точности обработки ошибки регулирования (что также выражается в увеличении скорости работы регулятора), соответствующий временной интервал Δt_4 воспроизводился несколько раз за период ШИМ. Помимо этого, было учтено влияние коммутационной помехи в момент размыкания ключа и определенным образом сдвинут на время Δt_3 последний интервал времени обработки ошибки регулирования.

Проведен анализ работы на динамическую нагрузку в сравнении с аналоговой СУ.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию ИБС, для подтверждения того, что его свойства соответствуют реальной СБ.

Были проведены опыты для определения модуля импеданса (МИ) ИБС. Описана соответствующая методика проведения экспериментов. Полученные результаты измерения МИ ИБС для участков тока и напряжения ВАХ сопоставимы с расчетными, что позволяет считать применяемую методику адекватной. Результаты

исследования МИ ИБС на участке тока показали, что отклонения крайних значений МИ в процентном отношении в целом позволяют сказать, что участки тока и напряжения ВАХ ИБС монотонны и отвечают свойствам характеристик источников тока и напряжения до определенной частоты изменения нагрузки, когда на МИ начинает оказывать влияние реактивная составляющая. Тем не менее, учитывая фактические значения частоты изменения нагрузки (составляющей порядка 20 кГц, а зачастую не превышающей 2 кГц) для режимов СЭС КА в составе которых предназначено работать ИБС, можно заключить, что ИБС пригоден для наземных испытаний. Данное утверждение так же подтверждается многолетним применением ИБС с использованием схожей элементной базы на предприятиях космической отрасли.

Была измерена выходная емкость ИБС для различных шагов задания емкости. Методика измерения основана на законе Ома для участка цепи переменного тока с конденсатором. В соответствии, которому, емкость в цепи переменного тока можно найти по формуле:

$$C = I \frac{dt}{dU},$$

где I – ток через емкость, dt – время за которое изменяется напряжение емкости dU .

Для примера, в таблице 1 приведены результаты измерения емкости $C_{ИБС}$ для начального (0,31 мкФ) и конечного (3,61 мкФ) значений задания емкости на разных частотах. При частоте коммутации ключа $VT1$ $f_{\text{меандр}} = 20000$ Гц, емкость величиной 3,61 мкФ не успевает зарядиться, так как для заряда требуется время около 110 мкс, а период данной частоты составляет 50 мкс.

Таблица 1

Измеренные значения емкости ИБС при различной частоте работы динамической нагрузки

$f_{\text{меандр}}$, Гц	Ток $I_{КЗ}$, А	Измеренные значения для уставок			
		$C_{0,31}$ зад		$C_{3,61}$ зад	
–	–	Измерение, мкФ	Δ , %	Измерение, мкФ	Δ , %
50	2	0,437	41,13	3,792	5,03
500		0,433	39,79	3,833	6,19
1000		0,431	39,11	3,875	7,34
2000		0,446	43,82	3,792	5,03
20000		0,444	43,15	–	–
–		Среднеквадратичное значение			
–	–	$C_{0,31}$ ср	$C_{0,31}$ %	$C_{3,61}$ ср	$C_{3,61}$ %
–	–	0,44	41,4	3,82	5,9

В результате проведенных исследований было выявлено, что фактические значения емкости выхода ИБС, взятого для изучения, отличаются от требуемых в техническом задании. Существенные отклонения в относительном выражении были получены для минимального значения задания емкости, что объясняется влиянием суммарной составляющей неучтенных при проектировании величин паразитных емкостей силовых элементов цепи выхода. Соответственно с каждым шагом увеличения задания емкости выхода, относительный вклад неучтенной составляющей емкости уменьшается.

Предложенная методика расчета емкости выхода объекта исследования была реализована в среде разработки Matlab/Simulink, где также была показана ее адекватность. Достоверность рассматриваемой методики определения емкости выхода ИБС в основе которой лежит теория электрических цепей и подтвержденная методом математического моделирования, позволяет в дальнейшем корректировать величину $C_{ИБС}$ на стадии настройки параметров перед вводом ИБС в эксплуатацию. Сопоставимые результаты при определении емкостей выхода математических моделей СБ и ИБС, позволяют рассматривать ИБС в данном аспекте в качестве адекватной замены СБ на стадии наземных испытаний СЭС КА.

На рисунке 13 изображен характериограф в составе рабочего места ИБС с помощью которого были исследованы различные режимы работы ИБС при переходах рабочей точки на ВАХ.



Рисунок 13 – Характериограф в составе рабочего места ИБС

На рисунке 14 изображены построенные с помощью характеристикографа осциллограммы ВАХ ИБС для параметров $I_{K3} = 8 \text{ A}$ и $U_{XX} = 60 \text{ В}$. На рисунке 14а изображены осциллограммы тока и напряжения во временной области для ВАХ с наклоном на участке тока. На рисунке 14б, изображены ВАХ ИБС построенные осциллографом в двух координатном XY-режиме для участка тока с наклоном. На ВАХ указаны рабочие точки, а на временных осциллограммах соответствующие им точки в координатах тока и напряжения.

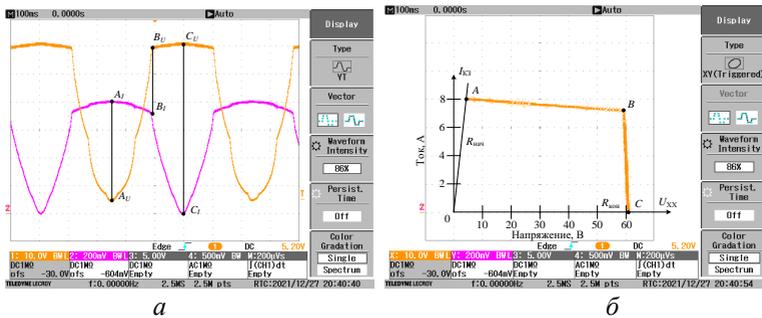


Рисунок 14 – Характеристикографические исследования: *а* – Осциллограммы выходных тока и напряжения для ВАХ ИБС с наклоном на участке тока; *б* – ВАХ ИБС с наклоном на участке тока

Полученные таким образом данные позволяют увидеть возможную некорректную работу ИБС. Характеристикографические исследования показали адекватность работы ИБС и соответствие его параметров заданным.

Установлено, что максимальное отклонение измеренных значений положений РТ внутренними приборами относительно внешних не превышает 2 %, что соответствующим образом характеризует точность измерительных приборов ИБС.

Полученная ВАХ ИБС монотонна и имеет один экстремум на участках тока и напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация посвящена исследованию способа формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электроснабжения космических аппаратов. Результаты исследования носят прикладной характер и заключаются в следующем.

1. Предложенная структура ИБС КА представляет имитатор как малоинерционный источник тока с новой системой управления, что обеспечивает повышение точности ВАХ, а также позволяет имитировать паразитную емкость СБ в отличие от иностранных ИБС. Потенциальным преимуществом новой структуры является увеличение предела мощности ИБС. На текущий момент имеется серийный ИБС с мощностью 3,6 кВт на один канал выхода.

2. Предложена математическая модель ИБС, предоставляющая возможность исследовать статические и динамические режимы его работы с погрешностью не более 12 %.

3. Разработана СУ с модификацией алгоритм-схемы жесткого ограничения пульсаций тока, что позволило уменьшить пульсацию тока короткого замыкания при динамическом изменении нагрузки на величину 33%.

4. Введена положительная обратная связь дополнительного сигнала в контур ПИД-регулятора, допускающая уменьшить пульсацию тока короткого замыкания при динамическом изменении нагрузки на величину 29 %.

5. Проработан переход на полностью цифровую СУ с присущими ей достоинствами (гибкость и простота изменения алгоритмов управления), что в свою очередь уменьшит время настройки, а следовательно, трудозатраты.

Проведенные экспериментальные исследования на макетном образце ИБС показывают, что его характеристики как формирователя ВАХ отвечают требованиям наземных испытаний СЭС КА, а созданные математические модели применимы для исследования и разработки.

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Рекутов О.Г. Анализ способов построения имитаторов солнечных батарей для физического моделирования систем электроснабжения космических аппаратов / О.Г. Рекутов, А.Г. Юдинцев // Доклады ТУСУР. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 108–115.

2. Рекутов О.Г. Метод формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем

электропитания космических аппаратов / О.Г. Рекутов, А.Г. Юдинцев // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 2(47). – С. 26–32.

3. Рекутов О.Г. Повышение качества формирования вольт-амперной характеристики имитатора солнечной батареи / О.Г. Рекутов, В.М. Рулевский, В. А. Пчельников, В. Л. Иванов, А.Г. Юдинцев // Практическая силовая электроника. – 2021. – № 2(82). – С. 12–17.

4. Рекутов О.Г. Сравнительный анализ систем управления имитатора вольт-амперной характеристики солнечной батареи / О.Г. Рекутов, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев, А.М. Малышенко // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 89–95.

5. Рекутов О.Г. Измерительный комплекс оценки качества энергопреобразующей аппаратуры для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / О.Г. Рекутов, А.Н. Пучков, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, А.Г. Юдинцев, Ю.А. Кремзуков, В.М. Рулевский // Приборы и техника эксперимента. – 2022. – № 2. – С. 52–56.

6. Рекутов О.Г. Определение модуля импеданса имитатора солнечной батареи для систем электроснабжения космических аппаратов / О.Г. Рекутов, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, А.Г. Юдинцев, В.М. Рулевский // Электротехника. – 2022. – № 1. – С. 36–40.

7. Рекутов О.Г. Определение выходной емкости имитатора солнечной батареи / О.Г. Рекутов // Практическая силовая электроника. – 2022. – № 2(86). – С. 37–41.

В изданиях, входящих в международные базы Scopus и Web of Science

8. Rekutov, Oleg & Surkov, Mikhail & Lyapunov, Danil & Muravlev, Alexey & Pravikova, Alexandra & Yudintsev, Anton & Rulevskiy, Victor & Bubnov, Oleg & Pchel'nikov, Victor. (2022). Simulators for Designing Energy-Efficient Power Supplies Based on Solar Panels. *Energies*. 15. 2480. 10.3390/en15072480.

9. Rekutov, O.G., Puchkov, A.N., Pchel'nikov, V.A. et al. A Measuring System for Assessing the Quality of Power Conversion Equipment for Testing Power-Supply Systems of Spacecraft. *Instrum Exp Tech* 65, 246–250 (2022). doi: 10.1134/S0020441222020063

10. Rekutov, O. & Pchel'nikov, V. & Bubnov, O. & Yudintsev, A. & Rulevskiy, V.. (2022). Determination of the Solar-Battery-Simulator Modulus of Impedance for Spacecraft Power-Supply Systems. *Russian Electrical Engineering*. 93. 34-38. 10.3103/S1068371222010059.

Патенты на изобретение и полезные модели РФ

11. Пат. 201749 Российская Федерация, МПК Н 01М 14/00. Устройство для имитации секционированной солнечной батареи / Пчельников В. А., Рекутов О. Г., Рулевский В. М., Юдинцев А. Г.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет

систем управления и радиоэлектроники. № 2020129126; заявл. 02.09.2020; опубл. 11.01.2021.

12. Пат. 2742379 Российская Федерация, МПК Н 01 L 31/00. Способ управления источником тока в имитаторе солнечной батареи / Пчельников В. А., Рекутов О. Г., Бубнов О. В., Иванов В. Л., Юдинцев А. Г.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2020122795; заявл. 03.07.2020; опубл. 05.02.21.

13. Пат. 208820 Российская Федерация, МПК Н 01L 31/00. Устройство управления ключами стабилизированного источника тока в имитаторе солнечной батареи / Рекутов О. Г., Пчельников В. А., Иванов В. Л., Юдинцев А. Г., Рулевский В. М., Бубнов О. В.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2021130566; заявл. 19.10.2021; опубл. 17.01.2022.

14. Пат. 201749 Российская Федерация, МПК Н 02М 3/156. Способ управления импульсным понижающим преобразователем напряжения со стабилизацией тока / Бубнов О. В., Рекутов О. Г., Царев А. А., Пчельников В. А.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2017113325; заявл. 17.04.2017; опубл. 23.07.2018.

15. Пат. 192946 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/40. Электронный многофункциональный имитатор для испытаний систем электроснабжения космических аппаратов / Бубнов О. В., Игнатенко В. В., Рекутов О. Г.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2019122531; заявл. 15.07.2019; опубл. 08.10.2019.

16. Пат. 176992 Российская Федерация, МПК Н 02 М 3/00. Активный фильтр для источника постоянного тока / Бубнов О. В., Рекутов О. Г.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2017124260; заявл. 07.07.2017; опубл. 06.02.18.

17. Пат. 218981 Российская Федерация, МПК G 01R 31/40. Устройство управления ключами стабилизированного источника тока в имитаторе солнечной батареи / Рекутов О. Г., Пчельников В. А., Бубнов О. В., Юдинцев А. Г., Карих Л. А.; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. № 2023112157; заявл. 12.05.2023; опубл. 21.06.2023.

Свидетельства об официальной регистрации программ для ЭВМ

18. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2021666782 Российская Федерация. Программа

управления модулем стабилизатора тока имитатора солнечной батареи / В. Л. Иванов, О. Г. Рекутов, А. Г. Юдинцев, В. М. Рулевский; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2021665971; заявл. 11.10.2021; опубл. 20.10.2021. – 1 с.

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2019618209 Российская Федерация. Программа управления понижающим преобразователем со стабилизацией тока выхода / О. Г. Рекутов; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». – № 2019616701; заявл. 10.06.2019; опубл. 26.06.2019. – 1 с.

Статьи в сборниках и трудах конференций

20. Рекутов О.Г., Способы формирования вольт-амперной характеристики имитатора солнечной батареи // Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XX науч.-техн. конф. (Томск, 16-17 апр. 2020 г.). – Томск: АО «НПЦ «Полус» 2020. – С.64–67.

21. Рекутов О.Г., Сравнительный анализ работы цифрового и аналогового регуляторов на примере понижающего преобразователя // Научная сессия ТУСУР-2019. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 280–283.

22. Рекутов О.Г., Программно-аппаратный комплекс предварительной диагностики силовых модулей контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания спутников // Электронные средства и системы управления-2019. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 131–133.

23. Рекутов О.Г., Активный фильтр для сглаживания высокочастотных пульсаций имитатора батареи солнечной // Электронные средства и системы управления-2019. – Томск: В-Спектр, 2019. – Ч. 1. – С. 170–172.

24. Рекутов О.Г., Оценка точности формирования вольт-амперной характеристики имитатора солнечной батареи / О.Г. Рекутов, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев // Электронные средства и системы управления-2021. – Томск: В-Спектр, 2021. – Ч. 1. – С. 203–206.