

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе и
инновациям ТУСУР,

канд. техн. наук, доцент

А.Г. Лоцилов



19» 06 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»

Диссертация «Разработка и исследование способа формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электроснабжения космических аппаратов» выполнена в отделе преобразования постоянного напряжения обособленного подразделения «Научно-исследовательском институте автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники».

В период подготовки диссертации соискатель Рекутов Олег Геннадьевич обучался в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» на кафедре компьютерных систем в управлении и проектировании, период обучения с 15.10.2018 г. по 10.10.2022 г., по направлению 13.06.01 Электро- и теплотехника, профиль 05.09.12 Силовая электроника. Выдан диплом об окончании аспирантуры.

С 2010 года и по настоящее время Рекутов О.Г. работает в обособленном подразделении «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники» в должности научного сотрудника.

Рекутов О.Г. в 2005 году закончил специалитет Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский политехнический университет», по специальности 14.06.04 «Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов». Выдан диплом инженера с отличием.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов №Ас/10 выдана в 2023 году Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники». Во время обучения Рекутов О.Г. сдал кандидатские экзамены по специальности 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника (технические науки), и получил следующие оценки:

- 1) иностранный язык (английский) – отлично;
- 2) история и философия науки (технические науки) – отлично;
- 3) 2.4.1 теоретическая и прикладная электротехника (технические науки) – отлично.

Научный руководитель – Рулевский Виктор Михайлович, доктор технических наук, доцент, ректор федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Актуальность диссертационной работы, оценка выполненной соискателем работы

Космические аппараты (КА) являются сложными и дорогостоящими электротехническими устройствами. Критически важным звеном КА является система электроснабжения (СЭС), обеспечивающая электроэнергией системы функционирования КА. 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 СБ 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 испытания СЭС КА, состоящей из ряда электротехнических комплексов: имитатора аккумуляторной батареи, имитатора батареи солнечной (ИБС), блока имитации нагрузки. Данные комплексы позволяют в полной мере

осуществить наземные испытания СЭС КА. Задачей ИБС является имитация первичного источника тока – солнечной батареи. В диссертационной работе поставлена и решена важная **научно-техническая задача** повышения точности формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электроснабжения космических аппаратов.

2. Личное участие автора в получении результатов

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.

3. Степень достоверности результатов работы.

Достоверность диссертационной работы подтверждается корректным использованием научно-обоснованных методов исследований, сходимостью экспериментальных и расчетных данных, принятыми допущениями, охраняемыми 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.

4. Научной новизной обладают следующие положения:

1. Структура ИБС КА с модифицированной топологией понижающего преобразователя, позволяющая представить имитатор как малоинерционный источник тока и новой системой управления, позволяющей обеспечить однозначный 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 ИБС показывают, что за счет разработанных схемотехнических и алгоритмических решений, ИБС отвечает предъявляемым требованиям. Частотные характеристики импедансов ИБС соответствуют источнику тока для участка тока ВАХ и источнику напряжения для участка напряжения ВАХ. ИБС способен имитировать паразитную емкость СБ и формировать заданную ВАХ в статическом режиме с возможным наклоном на участке тока с погрешностью не более 2 %.

5. Практическая значимость

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

6. Ценность научных работ соискателя

Полученные результаты диссертационной работы использованы в виде схемотехнических и программных решений при разработке ИБС для наземной обработки СЭС КА в рамках научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ НИИ АЭМ ТУСУР (г. Томск). По результатам исследований получены патенты и свидетельства на ПО.

7. Специальность, которой соответствует диссертация

Диссертационная работа Рекутова Олега Геннадьевича по своему содержанию соответствует специальности 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника, пунктам паспорта специальности:

разработка научных основ, анализ и экспериментальные исследования процессов преобразования (выпрямления, инвертирования, импульсного, частотного и фазочастотного регулирования и т.п.) в устройствах силовой

электроники, создания схем и устройств и моделей силовой электроники, исследование свойств и принципов функционирования элементов схем и устройств (пункт 9 паспорта специальности);

математическое и схемотехническое моделирование преобразовательных устройств, оптимизация преобразователей, их элементов и узлов (пункт 10 паспорта специальности).

8. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных автором

Результаты исследования опубликованы в 24 работах, в том числе: 7 статей в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ, 3 статьи в изданиях индексируемых Scopus / Web of Science.

Получено 2 патента РФ на изобретение и 5 патентов РФ на полезную модель. Получено 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ.

Научные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК

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.

Статьи в изданиях, входящих в международные базы Scopus / Web of Science

8. Rekutov, Oleg & Surkov, Mikhail & Lyapunov, Danil & Muravlev, Alexey & Pravikova, Alexandra & Yudintsev, Anton & Rulevskiy, Victor & Bubnov, Oleg & Pchelnikov, 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. & Pchelnikov, 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.

Свидетельство 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 «Полюс» 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.

Личный вклад автора составил в опубликованных работах [5, 6, 8, 10, 11, 24] – 20%, [12, 13, 14] – 30%, [15, 16] – 40%, [3, 4, 9, 18, 23] – 50%, [1, 2, 17] – 80%, [7, 19-22] – 100%.

9. Общее заключение

Диссертация Рекутова Олега Геннадьевича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение комплекса научно-технологических задач и полностью отвечает требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 № 842), предъявляемых к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Диссертация Рекутова Олега Геннадьевича «Разработка и исследование способа формирования вольт-амперной характеристики имитатора батареи солнечной для испытания систем электроснабжения космических аппаратов» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника.

Заключение принято на заседании научно-технического семинара Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники».

Присутствовало на заседании — 15 чел., в том числе докторов технических наук — 4, кандидатов технических наук — 5.

Результаты голосования: «за» — 15 чел., «против» — 0, «воздержалось» — 0, протокол № 1 от «15» июня 2023 г.

Председатель семинара:

Заведующий кафедрой компьютерных систем в управлении и проектировании федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

доктор технических наук,
профессор

Шурыгин
Юрий Алексеевич

15.06.23

Секретарь семинара:

Декан факультета электронной техники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Кандидат технических наук

Каранский
Виталий Владиславович

15.06.23

Подпись Шурыгина Ю.А., Каранского В.В. заверяю:

Ученый секретарь
ФГБОУ ВО «Томский
государственный университет
систем управления и
радиоэлектроники»



Прокопчук
Елена Викторовна

15.06.23