

На правах рукописи



Козлов Роман Викторович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ГЕОСТАЦИОНАРНОГО КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА**

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и Акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева

Научный руководитель:

Букреев Виктор Григорьевич
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Симонов Борис Ферапонтович,
доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник ФГБУН Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск

Жусубалиев Жаныбай Турсунбаевич,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительной техники ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет», г. Курск

Защита состоится: «24» ноября 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.12 на базе ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО НИ ТПУ по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 53а, и на сайте <https://dis.tpu.ru>

Автореферат разослан «____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
ДС.ТПУ.12, к.т.н., доцент



Андреев Михаил Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) осуществляется по критерию экстремума энергомассовых характеристик. Это условие предполагает, что при заданной мощности полезной нагрузки и служебных систем и определенных факторах космического пространства на интервале активного существования КА масса СЭП должна быть минимальной.

Максимальная масса космического аппарата, которую возможно вывести на целевую орбиту, обратно пропорциональна высоте этой орбиты. Поэтому стоимость вывода КА на геостационарную орбиту (36 тыс. км) является весьма значительной по сравнению со стоимостью вывода на более низкие орбиты. Современные СЭП КА обладают удельной мощностью на уровне от 25 до 32 Вт/кг, что при мощности полезной нагрузки 10 кВт дает массу системы 400 кг. При этом повышение удельной мощности СЭП дает синергетический эффект, когда одновременно высвобождаются ресурсы и массы, и мощности для установки на борт КА дополнительной полезной нагрузки. Поэтому при разработке СЭП, в особенности для геостационарных КА, наибольшее внимание уделяется поиску способов повышения энергомассовых характеристик СЭП.

В состав современных СЭП геостационарных КА входят: батарея солнечная (БС), комплект аккумуляторных батарей (АБ), прибор контроля и защиты АБ (ПКЗ АБ), а также системообразующий элемент СЭП – энергопреобразующая аппаратура (ЭПА).

В космических аппаратах различного назначения широко применяются системы электропитания параллельной или последовательно-параллельной структуры, в состав которых входит энергопреобразующая аппаратура на базе ключевых преобразователей с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) понижающего и (или) повышающего типа. Вопросы создания СЭП параллельной или последовательно-параллельной структурной схемы с ЭПА на базе повышающих и (или) понижающих ШИМ преобразователей, которая обеспечивает наилучшие энергомассовые характеристики, достаточно хорошо изучены.

Вместе с тем в настоящее время наблюдается рост научно-технического интереса к разработкам ЭПА с применением мостовых резонансных инверторов импульсных преобразователей. К преимуществам таких СЭП, которые позволяют улучшить ее энергомассовые характеристики, относят: снижение уровня генерируемых помех, уменьшение массы выходных фильтров преобразователей за счет повышения частоты коммутации ключевых элементов, исключение силовых коммутаторов подключения БС и АБ и т.д.

Наряду с этими преимуществами открываются новые возможности в части повышения удельных энергомассовых характеристик СЭП КА путем изменения параметров межблочного силового интерфейса СЭП, например, варьированием диапазонами рабочих напряжений АБ и БС.

Поэтому теоретические исследования в направлении улучшения энергомассовых характеристик СЭП на базе мостовых резонансных инверторов, а также разработка практических рекомендаций по их оптимизации является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности

Значительный вклад в создание теории и практики СЭП КА сделан такими известными учеными и инженерами, как М.Ф. Решетнев, Б.П. Соустин,

В.И. Иванчура, Г.Д. Эвенков, В.С. Кудряшов, В.Н. Школьный, В.О. Эльман, А.Б. Базилевский, М.Б. Каган, М.В. Лукьяненко, Borthomieu Y., Ligneel E, R. M. Nelms, L.L. Grigsby, Bauer P., Mukund R. Patel, John P.W. Stark, и рядом других.

Среди организаций, занимающихся разработкой СЭП и их составных частей, можно выделить: АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева, (г. Железногорск), АО «НПЦ «Полус» (г. Томск), ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ Прогресс» (г. Самара), ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» (г. Химки), РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (г. Королев), НИАИ «Источник» (г. Санкт-Петербург), ПАО «Сатурн» (г. Краснодар), АО «НПП «Квант» (г. Москва), Lockheed Martin Space Systems Company (США), Space Systems/Loral (США), The Boeing Company (США), Thales Alenia Space (Франция, Италия), Saft Company (Франция) и другие.

Количество публикуемых зарубежных и отечественных работ по теме исследования, а также объективная необходимость улучшения энергомассовых характеристик СЭП геостационарных КА свидетельствует об устойчивом научном и инженерном интересе к этому вопросу.

В диссертационной работе поставлена и решена **научно-техническая задача** улучшения энергомассовых характеристик СЭП космических аппаратов.

Объектом исследования является система электропитания геостационарного космического аппарата.

Предмет исследования – структуры и модели систем электропитания, методики оптимизации их параметров в статических режимах работы полезной нагрузки космического аппарата.

Целью научно-квалификационной работы является максимизация удельной выходной мощности СЭП геостационарного космического аппарата.

Для достижения данной цели были решены следующие **задачи**:

1. Определена структура СЭП, тип и состав ее элементов как объекта исследования.
2. Сформулированы требования к имитационной модели СЭП как инструменту проведения исследования.
3. Разработана имитационная модель СЭП геостационарного КА в статических режимах работы. Подтверждена ее адекватность по результатам экспериментальных исследований.
4. Разработана методика оценки энергетических характеристик энергопреобразующей аппаратуры СЭП.
5. Проведена оптимизация энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА рассматриваемой структуры и составных частей СЭП.
6. Сформулированы рекомендации для технического задания на разработку нового поколения системы электропитания.

Методы исследования. В качестве основных методов теоретического исследования использовались принципы построения электротехнических устройств и силовой преобразовательной техники, методы аналитического моделирования химических источников тока, методы математического моделирования и численного решения систем линейных дифференциальных уравнений. Имитационные исследования проводились с применением программы MatLab Simulink. Теоретические результаты подтверждались экспериментальными исследованиями на стендовом оборудовании из состава производственной базы АО «ИСС», АО «НПЦ «Полус» и АО «Сатурн» на опытно-промышленных образцах БС, ЛИАБ и силовых модулях ЭПА.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется строгим обоснованием расчетных методик и принимаемых допущений, корректным использованием современных методов научных исследований, а также подтверждается многочисленными экспериментальными исследованиями на макетных и опытно-промышленных образцах. Все разделы диссертационной работы логически взаимосвязаны, а выводы и рекомендации органически вытекают из материалов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- предложена структура СЭП на основе мостовых резонансных инверторов с гальванической трансформаторной развязкой АБ и БС от нагрузки, обеспечивающих возможность независимого варьирования в некоторых пределах диапазонами рабочих напряжений БС и АБ с сохранением параметров энергетической и энергомассовой эффективности;

- разработана методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры, позволяющая представить нелинейную зависимость КПД от выходной мощности в виде линейной функции зависимости выходной мощности от входной с двумя константами, которые обозначаются как «коэффициент передачи мощности» и «собственное потребление»;

- создана имитационная модель СЭП геостационарного КА в статических режимах работы, реализующая функцию экстремального регулирования мощности БС, заряда АБ в квазипотенциостатическом режиме, с возможностью масштабирования для требуемого количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ необходимой емкости;

- предложена методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП, обеспечивающая достижение ее максимальной удельной мощности в заданном диапазоне изменения количества последовательно соединенных фотопреобразователей в БС и аккумуляторов в АБ.

Практическая значимость работы:

- получены расчетные значения количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и фотопреобразователей в БС, удовлетворяющие условию положительного энергетического баланса геостационарного КА и обеспечивающие максимальную удельную мощность СЭП;

- создана вычислительная программа в пакете Matlab Simulink для моделирования энергетических процессов в статических режимах работы СЭП с возможностью масштабирования количественного состава ее элементов.

Научные положения, выносимые на защиту:

- структура системы электропитания, позволяющая реализовать гальваническую развязку солнечной и аккумуляторной батарей от нагрузки и обеспечить возможность улучшения ее энергомассовых характеристик за счет оптимизации рабочих диапазонов напряжений БС и АБ для заданной выходной мощности;

- методика оценки энергетической эффективности ЭПА, определяющая с погрешностью не более 1,5% по критерию трех сигм нормального распределения случайной величины параметры силовых преобразователей при расчете энергетического баланса КА во всем диапазоне рабочих напряжений БС и АБ;

- имитационная модель СЭП для статических режимов работы, позволяющая выполнить расчет энергетического баланса КА для заданной мощности нагрузки и

количества последовательно соединенных элементов в БС и АБ с учетом нестационарности их вольт-амперных характеристик;

- методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП, обеспечивающая достижение ее максимальной удельной мощности в заданном диапазоне изменения количества последовательно соединенных фотопреобразователей в БС и аккумуляторов в АБ.

Личный вклад автора. Научные результаты, выносимые на защиту и составляющие основное содержание диссертации, получены автором самостоятельно. В публикациях [5-7] рассмотрены и предложены варианты структурных схем СЭП; в публикациях [1, 2] разработаны и сформулированы положения методики оценки энергетической эффективности ЭПА; в публикациях [3, 8, 9] разработана и подтверждена адекватность имитационной модели СЭП; в публикации [4] разработана методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП. Автор непосредственно разрабатывал имитационную модель СЭП, методику оптимизации энергомассовых характеристик СЭП, участвовал в проведении экспериментальных исследований в части обработки качественных и количественных данных.

Реализация результатов диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении проектов в АО «Информационные спутниковые системы» (г. Железногорск) в виде структурных и параметрических проектных решений при разработке СЭП КА.

Методика, позволяющая осуществлять оценку параметров энергетической эффективности ЭПА различной структуры и типов силовых преобразователей при расчете энергетического баланса КА, применяется при проектировании СЭП в АО «ИСС».

Созданные в работе новые структуры, модели СЭП и методика оптимизации ее энергомассовых характеристик используются в образовательном процессе «Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета» при подготовке студентов магистратуры по направлению 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Использование результатов диссертационной работы подтверждается актами внедрения АО «ИСС» и ФГАОУ ВО НИ ТПУ.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Положения научной работы соответствует паспорту специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы», п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.2 «Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем» и п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Апробация результатов работы.

Основные научные положения и результаты диссертационной работы были представлены и докладывались на семинарах отделения электроэнергетики и

электротехники Инженерной школы энергетики НИ ТПУ, на производственных совещаниях АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнёва, а также на следующих конференциях: XXI Международная научно-практическая конференция «Решетневские чтения» (Красноярск, 2017 г.), XX научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» (АО «НПЦ «Полус», г. Томск, 2020 г.), XX научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» (АО «НПЦ «Полус», г. Томск, 2018 г.), XXI международной конференции молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным приборам (EDM 2020)» (дистанционно).

В период аспирантской подготовки результаты исследований докладывались на семинарах отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики НИ ТПУ и отделения электрического проектирования и испытаний космических аппаратов АО «ИСС».

Публикации.

Основные положения и результаты проведенных исследований отражены в 14 публикациях, из них 4 – в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 1 – в индексируемых базах Scopus и Web of Science, получено 3 патента РФ на изобретения, 1 свидетельство на программу для ЭВМ, в материалах конференций опубликовано 5 работ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 87 наименований. Диссертация изложена на 176 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 25 таблиц, 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость выполненных исследований, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен краткий обзор и анализ существующих структурных схем СЭП геостационарных КА. Рассмотрены эволюция структурных схем, их преимущества и недостатки, а также области рационального применения. В результате обзора показано, что основными структурными схемами СЭП КА являются последовательно-параллельная и параллельная схемы.

Рассмотрен ряд новых СЭП¹²³ модульной структуры, в которых в качестве силовых регуляторов применяются мостовые резонансные инверторы. Структурная схема модульной системы электропитания представлена на рисунке 1.

¹ Козлов Р.В. Система электропитания космического аппарата / Кудряшов В.С., Эльман В.О., Козлов Р.В. [и др.] / Патент на изобретение RU 2396666 С1. Оpubл.: 10.08.2010. Бюл. № 22.

² Козлов Р.В. Система электропитания космических аппаратов / Гордеев К.Г., Кочура С.Г., Козлов Р.В., Нестеришин М.В., Черданцев С.П. / Патент на изобретение RU 2680245 С1. Оpubл.: 19.02.2019. Бюл. № 5.

³ Козлов Р.В. Система электропитания космического аппарата / Коротких В.В., Козлов Р.В., Нестеришин М.В., Опенько С.И. / Патент на изобретение RU 2699084 С1. Оpubл.: 03.09.2019. Бюл. № 25.

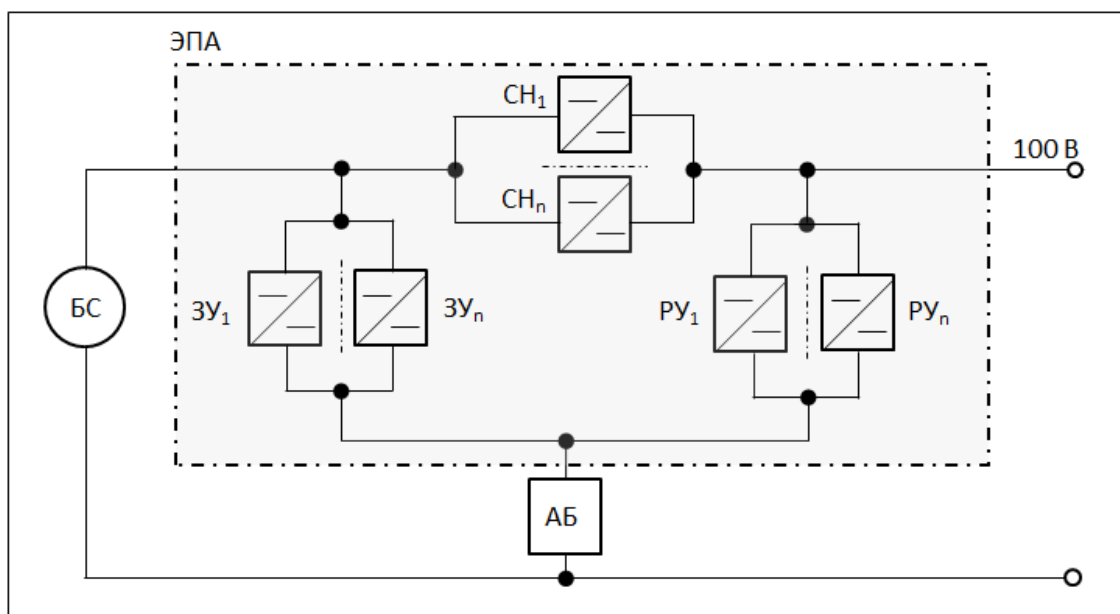


Рисунок 1 – Структурная схема модульной СЭП с мостовыми резонансными инверторами

Преимуществом применения разработанной СЭП является модульная структура, т.е. возможность обеспечивать требуемую выходную мощность СЭП необходимым количеством параллельно соединенных силовых модулей стабилизаторов напряжения (СН), зарядных устройств (ЗУ) и разрядных устройств (РУ). Также ключевым преимуществом предложенной схемы СЭП является применение в качестве преобразующих модулей СН и РУ мостовых резонансных инверторов, которые, в отличие от классических преобразователей, позволяют задавать требования к диапазону рабочего напряжения БС и АБ независимо от значения выходного напряжения СЭП, с сохранением энергомассовых характеристик ЭПА.

Далее рассмотрена методика формирования требований к СЭП КА, основанная на процедуре расчета энергетического баланса. Методика предполагает выполнение следующих основных этапов:

1. Осуществляется идентификация основных требований к космическому аппарату, а именно: САС, параметры орбиты, циклограмма нагрузки, условия освещенности панелей БС.
2. Проводится анализ и выбор наиболее подходящей структурной схемы СЭП. Критериями выбора являются: наличие технических решений, опытных образцов или прототипов оборудования СЭП, их энергетическая эффективность.
3. Выполняется анализ и выбор типов первичного и вторичного источников энергии СЭП: БС и АБ. Техническими критериями выбора являются значения удельной мощности и массы БС (Вт/кг; Вт/м²; кг/м²) и энергоемкости АБ (Вт×ч/кг).
4. Формируются перечень и значения исходных данных для расчета энергетического баланса КА. К ним относятся: параметры энергетической эффективности составных частей СЭП (удельная мощность, энергоемкость, коэффициенты полезного действия ЭПА), коэффициенты деградации параметров составных частей СЭП от воздействия внешних воздействующих факторов, условия освещенности БС и т.д.
5. Обосновываются расчетные случаи для определения энергетического баланса КА.

6. Рассчитывается энергетический баланс КА с определением значений необходимой мощности БС, энергоемкости АБ и требуемой выходной мощности ЭПА.
7. Выполняется подбор количественного состава составных частей СЭП (БС, АБ, ЭПА, ПКЗ АБ) по критерию наиболее близкого соответствия расчетным значениям параметров при условии соблюдения положительного энергетического баланса КА.
8. Проводится согласование силового межблочного электрического интерфейса СЭП, целью которого является подтверждение соответствия диапазонов установившихся значений токов и напряжений между составными частями СЭП.
9. Осуществляется расчет энергетического баланса КА с использованием найденных параметров количественного состава составных частей СЭП с определением уровня проектных запасов характеристик СЭП.
10. Формируются требования к массогабаритным параметрам СЭП и ее составных частей на базе данных о массогабаритных характеристиках прототипов.

На любом этапе выполнения методики определения требований к СЭП возможен возврат к предыдущим пунктам и их повторное выполнение в случае, если первоначальные оценки каких-либо характеристик привели к неудовлетворительному результату.

Качественно циклограмма нагрузки геостационарного КА может быть представлена, как показано на рисунке 2.

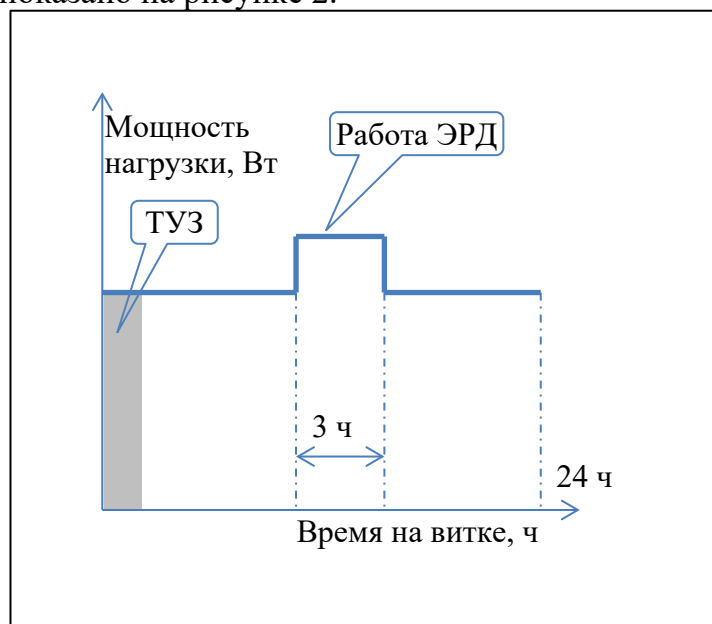


Рисунок 2 – Типовая циклограмма нагрузки геостационарного КА

Принятые сокращения: ТУЗ – теневого участка Земли; ЭРД – электрореактивный двигатель

Условие положительного энергетического баланса записывается в виде неравенства:

$$E_{\text{ЗАР}} \geq \frac{E_{\text{РАЗР}}}{K_{\text{АБ}}}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ЗАР}}$ – энергия, получаемая АБ на заряде за расчетный период времени (виток), Вт×ч; $E_{\text{РАЗР}}$ – энергия разряда АБ за расчетный период (при прохождении ТУЗ и, если требуется, при работе ЭРД), Вт×ч; $K_{\text{АБ}}$ – энергетический коэффициент полезного действия АБ по циклу разряд-заряд, т.е. отношение разрядной энергии к зарядной для достижения одинакового уровня заряженности, о.е.

В диссертации решается задача оптимизации энергомассовых характеристик СЭП космического аппарата с использованием ее удельной выходной мощности:

$$P_{уд} = \frac{P_{СЭП}}{M_{СЭП}}, \quad (2)$$

где $P_{уд}$ – удельная выходная мощность СЭП, Вт/кг; $P_{СЭП}$ – номинальная выходная мощность СЭП, Вт; $M_{СЭП}$ – масса СЭП, кг.

Обобщенная структурно-функциональная схема рассматриваемой СЭП представлена на рисунке 3.

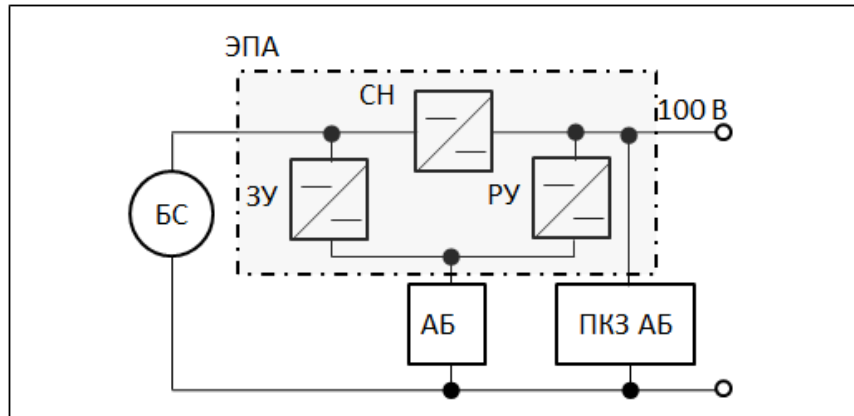


Рисунок 3 – Обобщенная структурно-функциональная схема СЭП

Расчетные значения массы СЭП и ее составных частей определяются следующими функциональными выражениями:

$$M_{СЭП} = M_{АБ} + M_{БС} + M_{ЭПА} + M_{ПКЗ\ АБ} + M_{БКС\ БС} + M_{БКС\ АБ} \quad (3)$$

$$M_{АБ} = f_1(C_{АБ}, N_{АКК_ПОСЛ}) \quad (4)$$

$$M_{БС} = f_2(N_{ФП_ПОСЛ}, N_{ФП_ПАРАЛЛ}) \quad (5)$$

$$M_{ЭПА} = f_3(P_{вых}, I_{АБР_max}, I_{АБЗ_max}, I_{БС_max}) \quad (6)$$

$$M_{ПКЗ\ АБ} = f_4(N_{АКК_ПОСЛ}) \quad (7)$$

$$M_{БКС\ БС} = f_5(I_{БС_max}) \quad (8)$$

$$M_{БКС\ АБ} = f_6(I_{АБР_max}), \quad (9)$$

где $M_{АБ}$, $M_{БС}$, $M_{ЭПА}$, $M_{ПКЗ\ АБ}$, $M_{БКС\ БС}$, $M_{БКС\ АБ}$ – массы АБ, БС, ЭПА, ПКЗ АБ, БКС БС, БКС АБ соответственно, кг; $C_{АБ}$ – ёмкость аккумуляторов в АБ, А×ч; $N_{АКК_ПОСЛ}$ – количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, шт; $N_{ФП_ПОСЛ}$, $N_{ФП_ПАРАЛЛ}$ – количество последовательно и параллельно соединенных ФП в БС, шт; $I_{АБР_max}$ – максимальный ток разряда АБ, А; $I_{АБЗ_max}$ – максимальный ток заряда АБ, А; $I_{БС_max}$ – максимальный ток БС, А; f_1-f_6 – функции зависимости массы составных частей СЭП от их параметров.

Сформулированы требования к имитационным моделям СЭП:

1. Соответствие структурной схеме ЭПА, используемой в системе электропитания.
2. Воспроизведение с достаточной для инженерных расчетов точностью (погрешность не более 5%) энергетических процессов реальной СЭП геостационарного КА.
3. Учет обоснованных параметров энергетической эффективности всех силовых энергопреобразующих устройств из состава СЭП.

4. Использование в качестве входных данных гарантируемых и предоставляемых разработчиками характеристик оборудования СЭП.
5. Иметь свойство масштабируемости за счет изменения количества последовательно и параллельно соединенных фотопреобразователей в БС и аккумуляторов в комплекте АБ, а также изменения емкости аккумуляторов в АБ.
6. Учитывать потери энергии в бортовой кабельной сети, а также потери энергии в ЭПА во всех режимах работы СЭП.
7. Учитывать взаимовлияние электрических и тепловых режимов БС при воспроизведении ее электрических характеристик.

Во второй главе рассматривается построение математической и имитационной моделей составных частей исследуемой СЭП и ее элементов.

Имитационная модель БС⁴ представлена уравнениями:

$$I = I_{sc} - I_s \cdot (e^{\beta \cdot (V - r \cdot I)} - 1) \quad (10)$$

$$r = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} - \frac{1}{\beta \cdot (I_{sc} - I_{opt})} \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\frac{I_{opt}}{I_{sc} - I_{opt}} + \ln(1 - \frac{I_{opt}}{I_{sc}})}{2 \cdot V_{opt} - V_{oc}} \quad (12)$$

$$I_s = \frac{I_{sc}}{e^{\beta \cdot V_{oc}} - 1} \quad (13)$$

$$I_{opt} = (I_{opt0} + Kt_{I_{opt}} \cdot F_0 \cdot (T - T_0)) \cdot N_p \cdot Ki_{opt} \quad (14)$$

$$I_{sc} = (I_{sc0} + Kt_{I_{sc}} \cdot F_0 \cdot (T - T_0)) \cdot N_p \cdot Ki_{sc} \quad (15)$$

$$V_{opt} = (V_{opt0} + Kt_{V_{opt}} \cdot (T - T_0)) \cdot N_s \cdot Kv_{opt} \quad (16)$$

$$V_{oc} = (V_{oc0} + Kt_{V_{oc}} \cdot (T - T_0)) \cdot N_s \cdot Kv_{oc} \quad (17)$$

$$Q_s - \frac{I \cdot V}{F_0} - (\varepsilon_L - \varepsilon_T) \cdot \sigma \cdot T^4 + (\alpha_{sL} - \alpha_{sT}) \cdot Q_{add} = \overline{cm}_f \cdot \frac{dT}{dt} \quad (18)$$

$$V_{dc}(I) = \frac{R_{\Sigma} \cdot I}{N_p} + V_{tdc} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_{sdc}} + 1\right) + \frac{r_{dc} \cdot I}{N_p} \quad (19)$$

$$V_{BC} = V + V_{dc}(I), \quad (20)$$

где I_s – обратный ток насыщения, А; $\beta = \frac{1}{V_t}$ – обратная величина теплового потенциала, В⁻¹; r – последовательное сопротивление БС, Ом; I – ток нагрузки БС, А; V – напряжение БС без учета блокирующих устройств, В; Ki_{opt} – коэффициент деградации тока в точке максимальной мощности за САС; Ki_{sc} – коэффициент деградации тока короткого замыкания за САС; Kv_{opt} – коэффициент деградации напряжения в точке максимальной мощности за САС; Kv_{oc} – коэффициент деградации напряжения холостого хода за САС; N_p – количество параллельно соединенных ФП; N_s – количество последовательно соединенных ФП; T_0 – температура, при которой измерены характеристики ФП; T – текущая температура ФП; F_0 – эффективная площадь БС, м²; $Kt_{I_{opt}}$ – температурный коэффициент по току в точке максимальной мощности ФП; $Kt_{I_{sc}}$ – температурный коэффициент по току короткого замыкания ФП; $Kt_{V_{opt}}$ – температурный коэффициент по

⁴ Козлов Р.В. Моделирование солнечных батарей космических аппаратов в программной среде SimInTech / А.М. Поляков, А.Р. Корсаков, Р.В. Козлов, А.С. Тетерин // Наукоемкие технологии. М.: Радиотехника 2017. Т. 18, № 12. С. 81-84.

напряжению ФП в точке максимальной мощности; Kt_{Voc} – температурный коэффициент по напряжению холостого хода ФП; I_{opt0} – ток одного ФП в точке максимальной мощности, измеренный при температуре T_0 ; I_{sc0} – ток короткого замыкания одного ФП, измеренный при температуре T_0 ; V_{opt0} – напряжение одного ФП в точке максимальной мощности, измеренное при температуре T_0 ; V_{oc0} – напряжение холостого хода одного ФП, измеренное при температуре T_0 ; I_{opt} – результирующий ток БС в точке максимальной мощности с учетом температуры, радиационной деградации и количества параллельно соединенных ФП; I_{sc} – результирующий ток короткого замыкания БС с учетом температуры, радиационной деградации и количества параллельно соединенных ФП; V_{opt} – результирующее напряжение БС в точке максимальной мощности с учетом температуры, радиационной деградации и количества последовательно соединенных ФП; V_{oc} – результирующее напряжение холостого хода БС с учетом температуры, радиационной деградации и количества последовательно соединенных ФП; Q_s – плотность теплового потока солнечного излучения, поглощенного лицевой поверхностью ФП, Вт/м²; Q_{add} – плотность теплового потока от КА и Земли поглощенная лицевой и тыльной сторонами ФП; σ – постоянная Стефана-Больцмана, равная $5,678 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); ε_L , ε_T – степень черноты лицевой и тыльной поверхностей ФП соответственно; α_{sL} , α_{sT} – интегральные коэффициенты поглощения лицевой и тыльной поверхностей ФП соответственно; $\overline{cm_f}$ – удельная теплоемкость ФП, Дж/(м²·К); $V_{dc}(I)$ – падение напряжения на блокирующем устройстве и соединительных проводах БС, В; V_{tdc} – тепловой потенциал блокирующего устройства, В; А; I_{sdc} – ток насыщения блокирующего устройства, А; r_{dc} – внутреннее электрическое сопротивление блокирующего устройства, Ом; $V_{БС}$ – результирующее напряжение БС с учетом потерь в блокирующих диодах и во внутренней кабельной сети БС, В.

Модель создана в программном пакете MATLAB Simulink с использованием инструмента Simscape. Внешний вид макетного образца для имитационной модели БС, реализованной в пакете инженерных расчетов MATLAB Simulink 2017b, показан на рисунке 4.

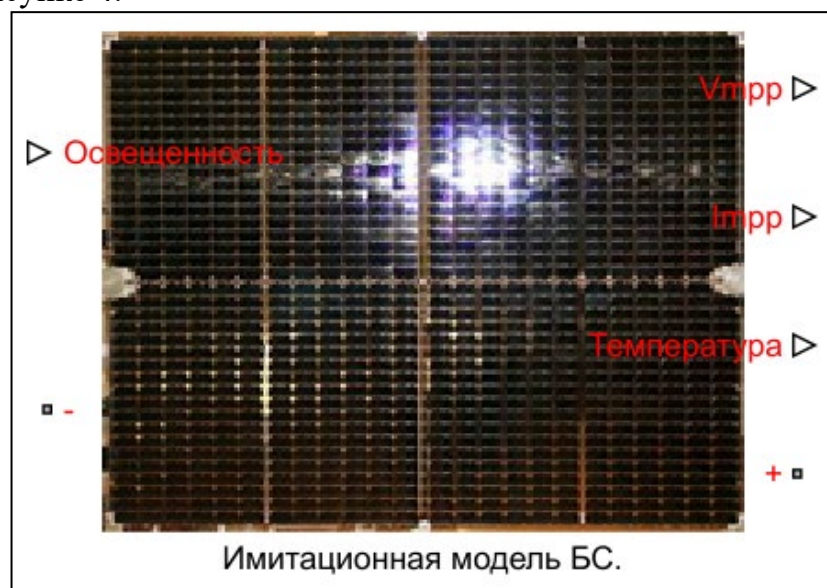


Рисунок 4 – Внешний вид блока имитационной модели БС в среде Simulink

Имитационная модель литий-ионной АБ представлена уравнениями:

$$\begin{cases} V_{AB} = E_0 - R \cdot i - \frac{Q \cdot (K_1 \cdot it + K_2 \cdot i)}{Q - it} + A \cdot (\exp(-B \cdot it) - 1) | i > 0 \\ V_{AB} = E_0 - R \cdot i - K_1 \cdot \frac{Q \cdot (K_1 \cdot it + K_2 \cdot i)}{Q - it} + A_1 \cdot A \cdot \exp(-B_1 \cdot B \cdot it) - 1 | i \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$K_1 = K_{1_0} \cdot \frac{Q_0^{max}}{Q^{max}} \quad (22)$$

$$K_2 = K_{2_0} \cdot \frac{Q_0^{max}}{Q^{max}} \quad (23)$$

$$B = B_0 \cdot \frac{Q_0^{max}}{Q^{max}} \quad (24)$$

$$A = A_0 \cdot \frac{V_{akk}^{max} \cdot N}{V_{akk_0}^{max} \cdot N_0} \quad (25)$$

$$R = R_{2\text{ЛИА85}} \cdot 2 \cdot N + \left(\frac{R_{2 \times 22\text{ЛИ85}} \cdot 2}{N_0} - R_{2\text{ЛИА85}} \cdot 2 \right) \cdot N, \quad (26)$$

где V_{AB} – напряжение АБ, В; E_0 – ЭДС АБ, В; i – ток заряда или разряда АБ, А; R – внутреннее сопротивление АБ, Ом; K_1 – константа поляризации, В/А·ч; K_2 – поляризационное сопротивление, Ом; Q – максимальная ёмкость АБ, А·ч; it – текущее значение ёмкости АБ, А·ч; A – эмпирический коэффициент модели, В; B – эмпирический коэффициент модели, А·ч⁻¹; K_{1_0} , K_{2_0} , B_0 , A_0 – идентифицируемые по экспериментальным данным прототипа параметры модели ЛИАБ; Q_0^{max} – максимальная ёмкость прототипа ЛИАБ, А·ч; N_0 – количество последовательно соединенных пакетов аккумуляторов прототипа; $R_{2\text{ЛИА85}}$ – значение внутреннего сопротивления одного пакета аккумуляторов прототипа, Ом; $R_{2 \times 22\text{ЛИ85}}$ – оцененное по экспериментальным данным значение сопротивления прототипа (ЛИАБ 2×22ЛИ85), Ом; N – количество аккумуляторов в моделируемой ЛИАБ; Q^{max} – максимальная ёмкость аккумулятора моделируемой ЛИАБ, А·ч.

Схема имитационной модели ЛИАБ представлена на рисунке 5.

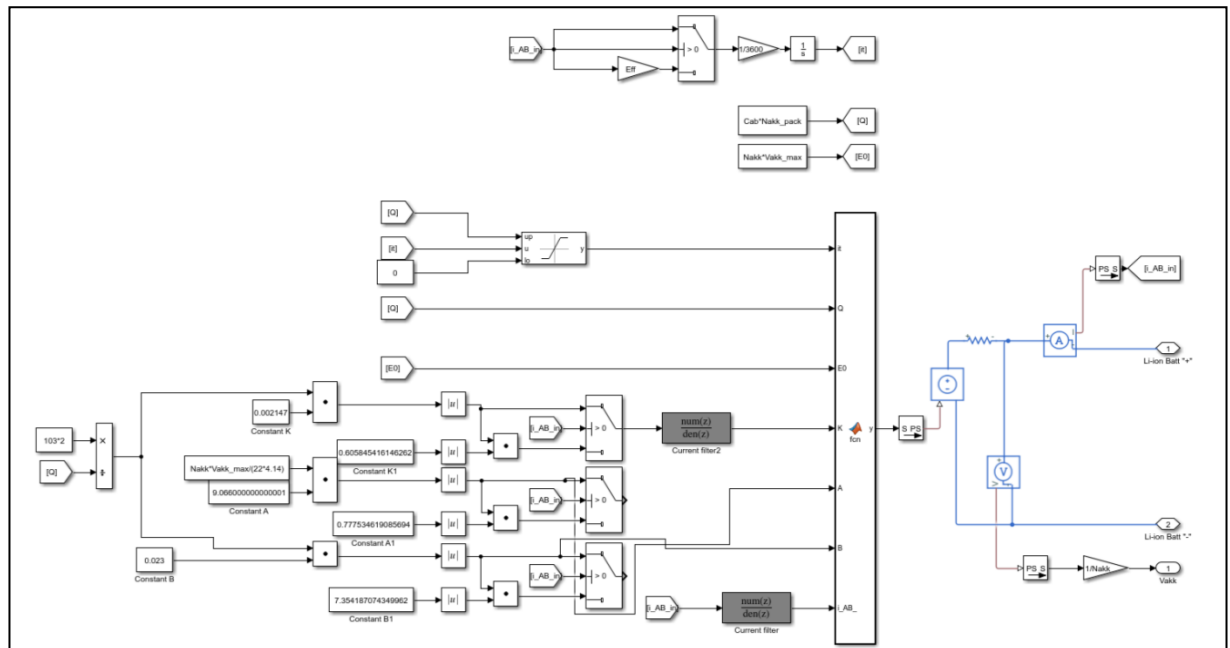


Рисунок 5 – Схема имитационной модели ЛИАБ в среде Simulink

Далее проведен анализ способов определения энергетических параметров ЭПА. Показано, что энергетическая эффективность ЭПА может быть с погрешностью не более 1,5 % для всего рабочего диапазона входных напряжений регуляторов описана комплексом параметров «коэффициент передачи мощности» и «собственное потребление»^{5,6,7}. Для определения параметров энергетической эффективности ЭПА используются следующие соотношения.

Коэффициент передачи мощности силового преобразователя – это отношение выходной полезной мощности передаваемой в нагрузку к разности между поступающей на вход силового преобразователя мощностью и мощностью собственного потребления преобразователя:

$$\text{КПМ} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{СОБ}}}. \quad (27)$$

При этом, мощность собственного потребления преобразователя, $P_{\text{СОБ}}$, как и коэффициент КПМ передачи мощности являются константами.

Мощность собственного потребления преобразователя определяется следующим образом:

$$P_{\text{СОБ}} = P_{\text{ВИП}} + P_{\text{рег.const}} \quad (28)$$

где $P_{\text{ВИП}}$ – мощность потребления схемы управления и вспомогательных устройств, обеспечивающих работу регулятора (например, вторичных источников питания), Вт; $P_{\text{рег.const}}$ – мощность собственного потребления регулятора, которая не зависит (или незначительно зависит) от значения мощности нагрузки (а также выходной мощности и соотношения входных и выходных напряжений), Вт.

Показано, что энергетическая эффективность ЭПА может быть аппроксимирована линейной моделью следующего вида:

$$y(x) = k \cdot x - b \quad (29)$$

где: $b = P_{\text{СОБ}} = P_{\text{ВИП}} + P_{\text{рег.const}}$; $k = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{СОБ}}}$.

Энергетическая модель ЭПА с использованием параметров «КПМ» и «собственное потребление ЭПА» описывается следующей системой уравнений

$$\begin{cases} P_{\text{БС}}(t) = \frac{P_{\text{Н}}(t) + P_{\text{СОБ}}}{K_{\text{СН}}} \Big| I_{\text{АБ}} = 0 \\ P_{\text{АБ}}^{\text{РАЗ}}(t) = \frac{P_{\text{БС}}(t) \cdot K_{\text{СН}} - (P_{\text{Н}}(t) + P_{\text{СОБ}})}{K_{\text{РУ}}} \Big| I_{\text{АБ}} < 0 \\ P_{\text{АБ}}^{\text{ЗАР}}(t) = \left(P_{\text{БС}}(t) - \frac{P_{\text{Н}}(t) + P_{\text{СОБ}}}{K_{\text{СН}}} \right) \cdot K_{\text{ЗУ}} \Big| I_{\text{АБ}} > 0 \end{cases} \quad (30)$$

⁵ Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / М.В. Нестеришин, В.Г. Букреев, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Том 21, № 1. С. 112-118.

⁶ Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи / М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Том 21, № 3. С. 98-102.

⁷ Методика определения энергетических параметров энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 302-303.

где: $P_{BC}(t)$ – текущая мощность БС, Вт; $P_{AB}^{PA3}(t)$ – текущая мощность разряда АБ, Вт; $P_{AB}^{3AP}(t)$ – текущая мощность заряда АБ, Вт; $P_H(t)$ – текущая мощность нагрузки, Вт; $P_{соб}$ – мощность собственного потребления ЭПА, Вт; K_{CH} – коэффициент передачи мощности СН, о.е.; K_{PY} – коэффициент передачи мощности РУ, о.е.; $K_{ЗУ}$ – коэффициент передачи мощности ЗУ, о.е.; I_{AB} – ток АБ (положителен в режиме «заряд», отрицателен в режиме «разряд»), А; t – модельное время, с.

Внешний вид имитационной модели СЭП представлен на рисунке 6, где цифрами обозначены составные части модели: 1 – модель задания освещенности БС; 2 – модель БС; 3 – модель кабельной сети между БС и ЭПА; 4 – обобщенная модель ЭПА, включающая в себя энергетическую модель ЭПА и интерфейсные блоки; 5 – модель задания мощности нагрузки; 6 – модель АБ; 7 – модель кабельной сети между АБ и ЭПА; 8 – алгоритм управления режимами работы ЭПА, обеспечивающий реализацию функции преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС, а также заряд АБ падающим током.

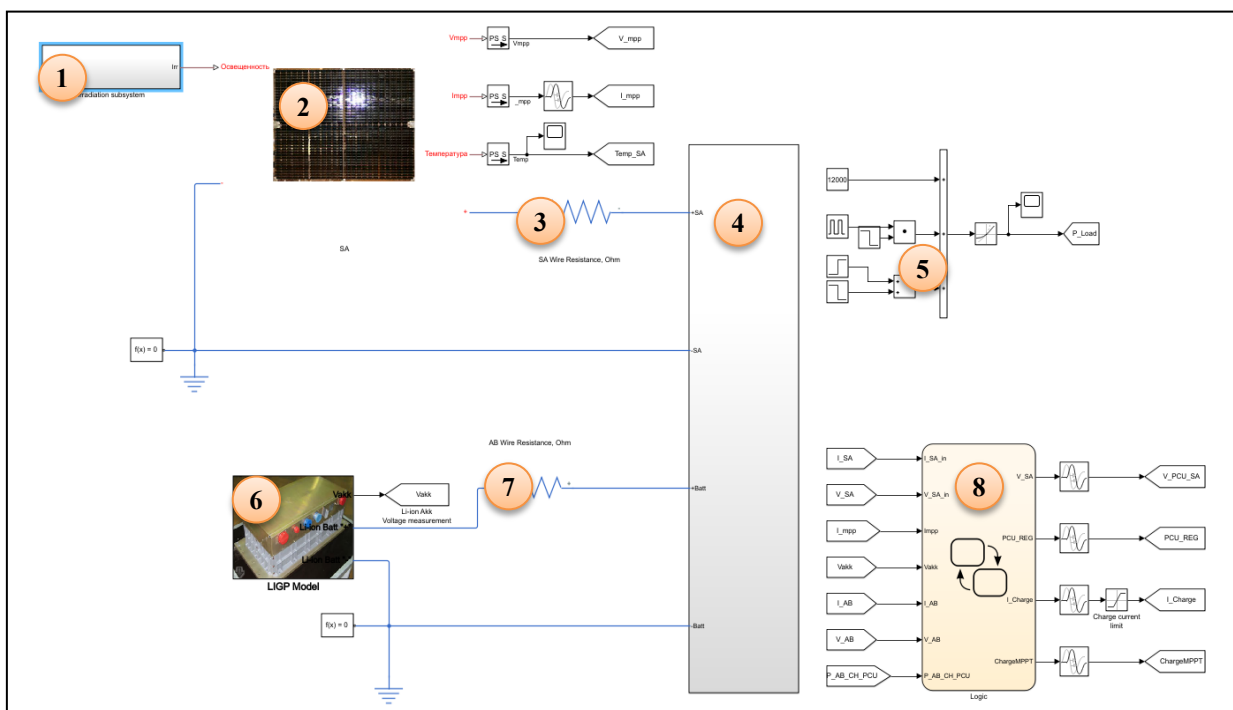


Рисунок 6 – Имитационная модель СЭП в среде Simulink

Разработанная имитационная модель СЭП^{8,9} геостационарного КА в статических режимах работы СЭП отличается тем, что в ней учтена нестационарность ВАХ БС, нестационарность разрядно-зарядной характеристики ЛИАБ, а также реализованы функции преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС и функция заряда ЛИАБ в квазипотенциостатическом режиме. Подтверждена адекватность имитационной модели СЭП путем проведения вычислительного эксперимента с использованием тестовой циклограммы нагрузки.

⁸ Simulation model of spacecraft power system for power balance calculation / R.V. Kozlov, V.G. Bukreev, M.V. Nesterishin, A.T. Lelekov International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM. 2020. –June. Статья № 9153514, P. 340-345.

⁹ Козлов Р.В. Имитационная модель системы электропитания космического аппарата в статическом режиме работы: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020613088. Оpubл.:10.03.2020. Бюл. № 3.

Обеспечена возможность масштабирования моделей путем изменения количественного состава их элементов (количества фотопреобразователей в БС и количества аккумуляторов в ЛИАБ).

В третьей главе представлены методика и результаты оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА. Сформированы функции расчета массы элементов СЭП. Исследованы возможности оптимизации системы БС – БКС БС. Показано, что существует такое сочетание количества последовательно соединенных ФП в БС и количества проводов заданной площади поперечного сечения БКС БС, для которого достигается минимум массы системы заданной выходной мощности. Показано, что достижение оптимального значения массы системы БС – БКС БС ограничено требованиями по токовой нагрузке БКС, изложенными в ГОСТ В 23584.

В ходе исследования возможностей оптимизации системы БС – БКС БС установлено, что с ростом количества последовательно соединенных фотопреобразователей БС могут наблюдаться локальные экстремумы удельной мощности (или минимумы массы) этой системы. Данный эффект представлен на рисунке 7.

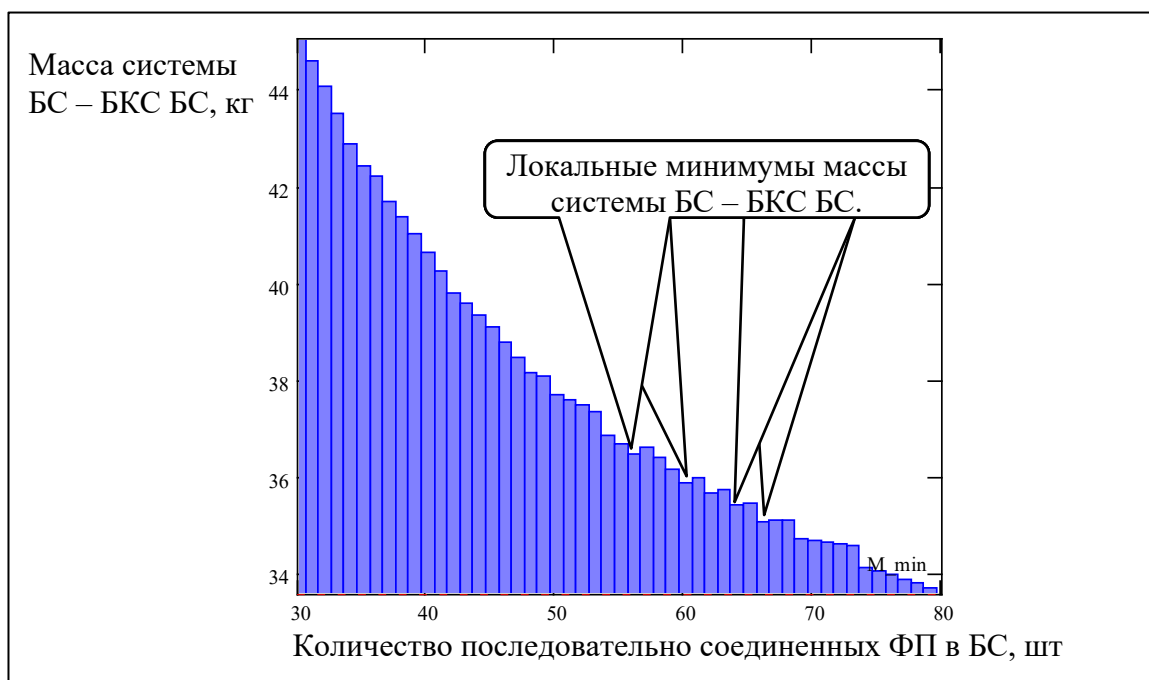


Рисунок 7 – Локальные минимумы массы системы БС – БКС БС при заданной выходной мощности и изменении количества последовательно соединенных ФП в БС

Исследована возможность оптимизации энергомассовых характеристик системы АБ – БКС АБ. В результате исследования установлено, что зависимость удельной энергии данной системы имеет экстремальный характер, т.е. существуют такие сочетания емкости и количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, для которых удельная энергоемкость системы оказывается наибольшей. Область максимальных значений удельной энергии системы АБ – БКС АБ показана на рисунке 8.

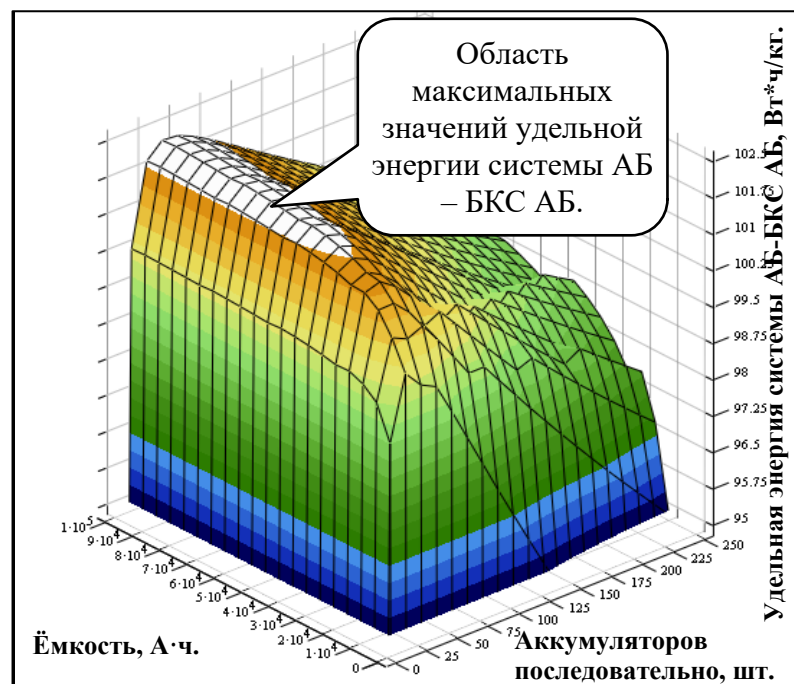


Рисунок 8 – Поверхность удельной энергоёмкости системы АБ – БКС АБ

Далее в результате анализа условий расчета энергетического баланса геостационарного КА сформирована следующая методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП¹⁰.

1. Формирование перечня режимов функционирования КА на орбите, которые определяют требования к характеристикам составных частей СЭП.
2. Определение диапазонов изменения количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и фотопреобразователей в БС.
3. Расчет с помощью имитационной модели характеристик СЭП, удовлетворяющих условию положительного энергетического баланса в заданных расчетных случаях для всех значений последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ из определенного диапазона. В ходе имитационного моделирования в каждом расчетном случае определяются следующие характеристики составных частей СЭП:
 - ёмкость комплекта АБ и требуемое количество параллельно соединенных ФП в БС для обеспечения положительного энергетического баланса;
 - количество проводов заданного сечения силовой кабельной сети между АБ и ЭПА, а также между БС и ЭПА;
 - количество каналов контроля и управления аккумуляторов в ПКЗ АБ;
 - количество силовых модулей заданной мощности и энергетической эффективности в ЭПА;
 - рабочие диапазоны напряжений и токов силового электрического интерфейса между БС и ЭПА, а также между АБ и ЭПА;
 - массы элементов СЭП: БС, АБ, ПКЗ АБ, ЭПА, БКС БС, БКС АБ;
 - значение удельной мощности СЭП как отношение значений выходной мощности СЭП к ее массе.
4. Формирование матрицы значений массы СЭП размерностью $[n;m]$, где n – диапазон изменения количества последовательно соединенных ФП в БС, а m –

¹⁰ Козлов Р.В., Букреев В.Г., Лелеков А.Т. Методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Том 24., № 1. С. 83-90.

диапазон изменения количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ.

5. Поиск соответствующих минимальному, при заданной выходной мощности, значению массы СЭП значений количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ.

Для расчета энергетического баланса геостационарного КА используются следующие условия функционирования КА:

- 1) конец срока активного существования (САС), момент осеннего равноденствия;
- 2) конец САС, момент летнего солнцестояния;
- 3) начало САС, момент осеннего равноденствия.

Масса СЭП геостационарного КА для выбранной выходной мощности определяется путем расчета имитационной модели СЭП при известных значениях параметров СБ и АБ исходя из действующих значений параметров СЭП в заданном расчетном случае по данным технических характеристик прототипов оборудования СЭП, указываемых производителями данного оборудования.

Результаты оптимизации энергомассовых характеристик СЭП мощностью 6 кВт по предложенной методике приведены на рисунке 9.

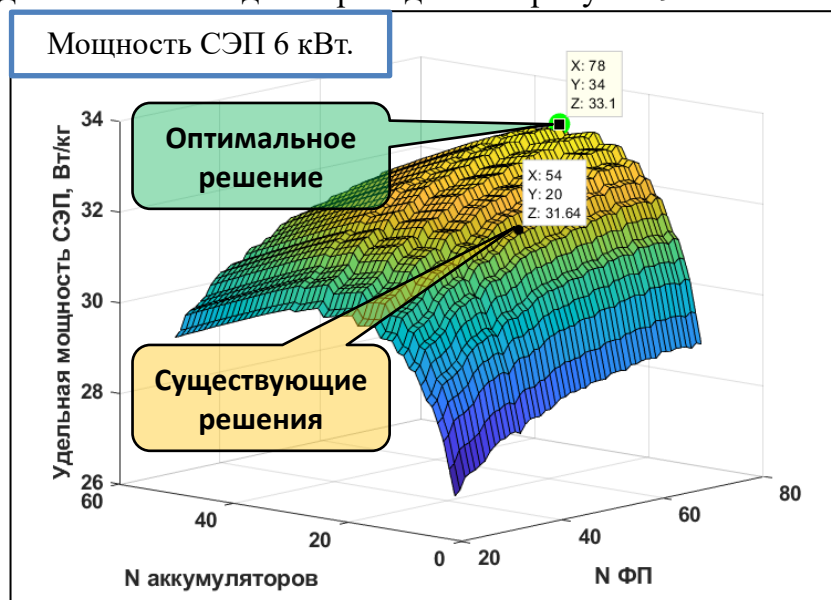


Рисунок 9 – Поверхность удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт в зависимости от количества последовательно соединенных элементов в БС и АБ

Результаты оптимизации энергомассовых характеристик трех вариантов СЭП геостационарного КА мощностью 6, 13 и 20 кВт приведены в таблице 1. Данные результаты предложены в качестве рекомендаций по проектированию новых СЭП в АО «ИСС».

Таблица 1 – Результаты оптимизации СЭП геостационарного КА

Параметр	Выходная мощность СЭП, кВт		
	6	13	20
Удельная мощность СЭП, Вт/кг	33,1	38,3	40,8
Количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, шт.	34	39	42
Количество последовательно соединенных ФП в БС, шт.	78	77	76

Диапазон рабочих напряжений АБ, В	92-141	105-162	113-174
Диапазон рабочих напряжений БС, В	140-160	138-160	136-160
Масса СЭП, кг	181,3	339,5	490,3
Емкость комплекта АБ, А×ч	106,2	191,0	268,5
Мощность БС в конце САС при освещенности 1367 Вт/м ² и температуре 28 °С, Вт	7 380	15 408	23 400

В четвертой главе рассмотрены технические средства для проведения экспериментальных исследований и верификации модели СЭП.

Верификация имитационной модели БС проведена с использованием результатов испытаний опытных образцов БС разработки АО «Сатурн» (г. Краснодар).

Для подтверждения адекватности модели БС использованы данные испытаний одной панели БС геостационарного КА, разработанного АО «ИСС». В панель БС входит 40 элементарных генераторов соединенных параллельно по 60 последовательно соединенных ФП в каждом элементарном генераторе. В качестве фотопреобразователей применены ФП марки TJ Solar Cell 3G30C (AZUR SPACE Solar Power GmbH).

Испытания реальной БС проводились на производственной базе АО «Сатурн» (г. Краснодар) с использованием импульсного осветителя автоматизированной контрольно-проверочной аппаратуры БС (АКПА БС).

Ошибка определения значений параметров ФП между модельными данными и данными производителя приведена в таблице 2.

Таблица 2 – Ошибка между модельными данными и данными производителя ФП

Параметр	Значение
Ошибка по току короткого замыкания ФП, %	0,44
Ошибка по току ФП в точке максимальной мощности, %	2,96
Ошибка по напряжению ФП в точке максимальной мощности, %	0,27
Ошибка по напряжению холостого хода ФП, %	1,45

Экспериментальные исследования реальных образцов АБ проводились на производственной базе АО «ИСС» в рамках этапа проверки АБ на функционирование. В ходе данных проверок испытываемая АБ разряжается до минимального рабочего напряжения, после чего осуществляется ее заряд до определенного уровня заряженности, который соответствует «транспортному» состоянию заряженности АБ.

В качестве испытательного оборудования для экспериментальных исследований использовался зарядно-разрядный программно-аппаратный комплекс (ЗРПАК) производства НИИ АЭМ ТУСУР (г. Томск). ЗРПАК состоит из специализированного аппаратно-программного комплекса (ПЭВМ) и трех стоек зарядно-разрядного комплекса (ЗРК 120/30/30), которые обеспечивают заряд и разряд литий-ионных АБ.

Экспериментальные исследования разработанной имитационной модели АБ проводились с использованием результатов испытаний литий-ионной аккумуляторной батареи производства АО «Сатурн», предназначенной для функционирования в составе СЭП КА на геостационарной орбите. Конфигурация использованной в экспериментальных исследованиях АБ 2×22ЛИ85, т.е. двадцать два последовательно соединенных пакета аккумуляторов, каждый пакет

аккумуляторов состоит из двух параллельно соединенных аккумуляторов гарантируемой емкостью 85 А×ч. Также в процессе экспериментальных исследований использована литий-ионная АБ производства АО «Сатурн» в конфигурации 23ЛИ65, т.е. 23 последовательно соединенных литий-ионных аккумулятора гарантируемой емкостью 65 А×ч каждый.

Отклонение 3 сигма нормального распределения случайной величины, вычисленное по измеренным и модельным значениям напряжения разрядной характеристики ЛИАБ составляет 0,43 В и не превышает 0,61 %.

Отклонение 3 сигма ошибки нормального распределения случайной величины, вычисленное по измеренным и модельным значениям напряжения разрядной характеристики образца ЛИАБ 23ЛИ65 составляет 1,06 В и не превышает 1,45 %.

Экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность применения разработанной методики оценки энергетической эффективности ЭПА, проводились на производственной базе АО «ИСС» и АО «НПЦ «Полюс». Результат применения методики оценки энергетической эффективности для ЭПА, представляющего собой стабилизатор (блок питания служебных систем КА – БП МСС) напряжения шины 27 В с напряжением на входе 100 В, представлены на рисунке 10.

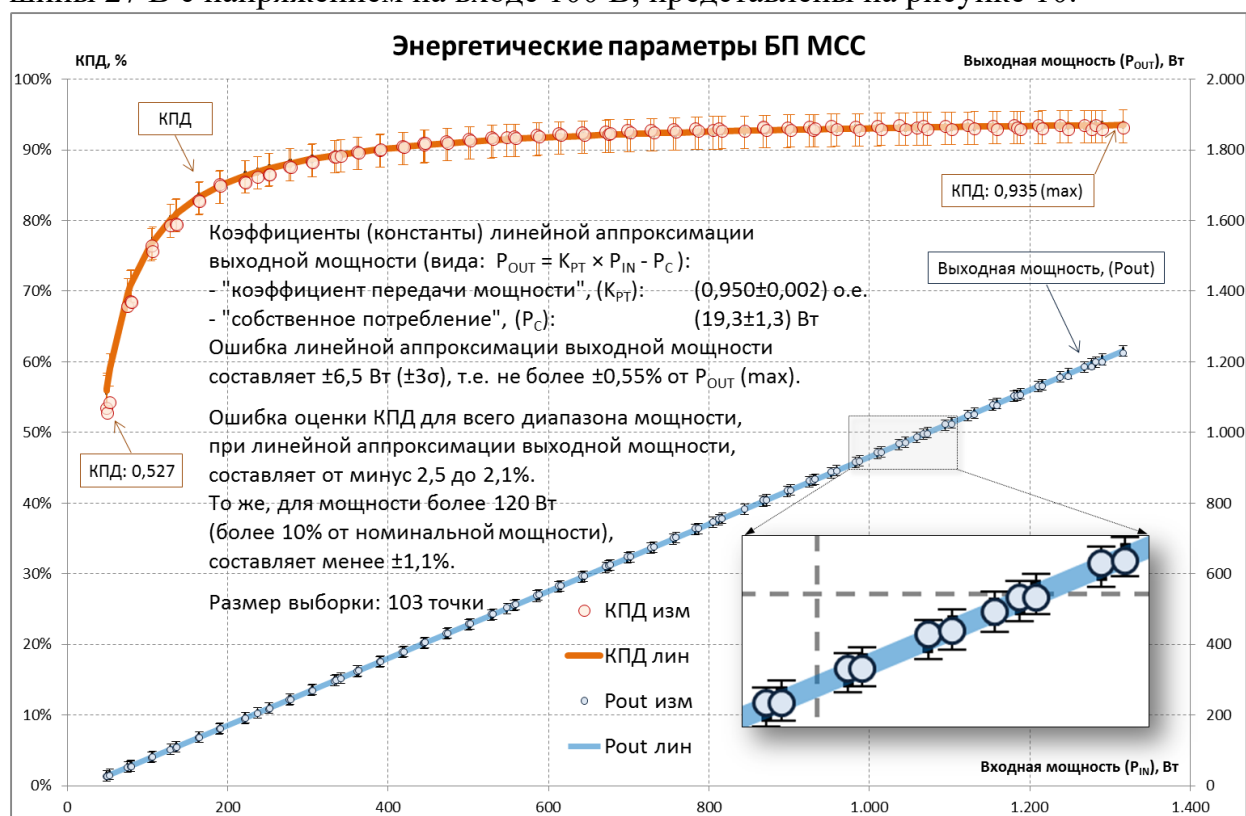


Рисунок 10 – Оценка энергетической эффективности БП МСС

Также для исследований использовались четыре образца ЭПА различной структуры и типов применяемых регуляторов мощности. Результаты исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения КПМ узлов и мощности собственного потребления ЭПА

ЭПА	K_{100}	$K_{ру}$	$K_{зу}$	K_{27}	P_C	$\sigma_{абс}$	$\sigma_{отн}$
№ 1	$0,9946 \pm 0,0060$	$0,9786 \pm 0,0084$	$0,9324 \pm 0,0111$	—	$112,3 \pm 65,1$	16,3	0,14
№ 2	$0,9790 \pm 0,0021$	$0,9536 \pm 0,0030$	$0,9687 \pm 0,0051$	$0,9144 \pm 0,0189$	$131,2 \pm 29,1$	21,3	0,14
№ 3	$0,9950 \pm 0,0018$	$0,9723 \pm 0,0021$	$0,9483 \pm 0,0042$	$0,8886 \pm 0,0087$	$78,2 \pm 12,3$	8,3	0,11
№ 4	$0,9797 \pm 0,0012$	$0,9790 \pm 0,0030$	$0,9669 \pm 0,0033$	$0,9703 \pm 0,0048$	$69,0 \pm 6,5$	8,5	0,18

В таблице 3 использованы следующие обозначения:

K_{100} – коэффициент передачи мощности от БС на шину 100 В, о.е.; K_{PY} – коэффициент передачи мощности от АБ на шину 100 В, о.е.; K_{3Y} – коэффициент передачи мощности от БС к АБ, о.е.; K_{27} – коэффициент передачи мощности от шины 100 В на шину 27 В, о.е.; P_C – собственное потребление ЭПА, Вт; σ_{abc} – абсолютная ошибка (значение СКО) модельной оценки мощности нагрузки по шине «100 В», относительно экспериментальных результатов; $\sigma_{отн}$ – относительная ошибка – отношение абсолютной ошибки к максимальному экспериментальному значению мощности нагрузки по шине «100 В».

Погрешность (3σ) модельной оценки параметра КПМ узлов ЭПА составляет от 0,0012 до 0,0189 относительно значений КПМ узлов ЭПА в диапазоне 0,8886...0,9950. Погрешность (3σ) модельной оценки параметра P_C составляет от 6,5 до 65,1 Вт при значениях собственного потребления ЭПА, составляющего 75...90 Вт для ЭПА средней мощности и 160...180 Вт для ЭПА большой мощности.

Также осуществлена оценка параметров энергетической эффективности опытных образцов модулей СН и РУ, выполненных по схеме мостовых резонансных инверторов. Результаты оценки показали, что идентифицированные по результатам анализа экспериментальных данных параметры энергетической эффективности ЭПА (СН, РУ, ЗУ) с погрешностью не более 1,5% по критерию 3σ нормального распределения случайной величины описывают реальные параметры энергетической эффективности ЭПА.

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что коэффициенты передачи мощности СН и РУ, выполненных по резонансной схеме, отличаются не более чем на 1,5% при практически идентичной массе. Это подтверждает возможность варьирования параметрами межблочного силового интерфейса между БС, АБ и ЭПА с сохранением энергомассовых характеристик ЭПА.

Результаты сравнительного анализа энергомассовых характеристик реальных образцов СЭП геостационарных КА и энергомассовых характеристик СЭП, полученных в результате моделирования, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики реальных образцов СЭП геостационарных КА в сравнении с характеристиками оптимизированных СЭП

Параметр	СЭП № 1	СЭП № 2	СЭП № 3	СЭП № 4	СЭП № 5	СЭП № 6
Мощность нагрузки, Вт	14 700	6740	6740	11000	7700	14700
Количество последовательно соединенных пакетов аккумуляторов, шт.	20	20	20	22	22	22
Количество последовательно соединенных ФП в БС, шт.	54	54	54	55	55	59
Удельная мощность реальных СЭП, Вт/кг	31,2	27,3	27,4	27,9	32,6	32,96
Удельная мощность СЭП, Вт/кг	37,9	34,1	34,1	37,5	35,9	38,7

Результаты анализа данных таблицы 4 показывают следующее:

1. При равной выходной мощности (СЭП № 1 и СЭП № 6 по табл. 4) увеличение количества последовательно соединенных ФЭП в БС и АК в АБ приводит к повышению удельной выходной мощности СЭП.
2. Более мощные СЭП при равном количестве последовательно соединенных элементов в БС и в АБ имеют более высокую удельную мощность (СЭП № 1 и СЭП № 2 по табл. 4).
3. Коэффициент корреляции между значениями удельной мощности реальных образцов СЭП №№ 1, 6 и значениями удельной мощности оптимизированных СЭП равен единице.
4. Коэффициент корреляции между значениями удельной выходной мощности реальных образцов СЭП №№ 2, 3, 5 и значениями удельной мощности оптимизированных СЭП равен единице.
5. Коэффициент корреляции между значениями удельной выходной мощности реальных образцов СЭП №№ 1, 2, 3, 5, 6 и значениями удельной мощности оптимизированных СЭП равен 0,82 (сильная зависимость).

Гистограммы сравнительного анализа удельной мощности реальных образцов СЭП и результатов моделирования приведены на рисунке 11.

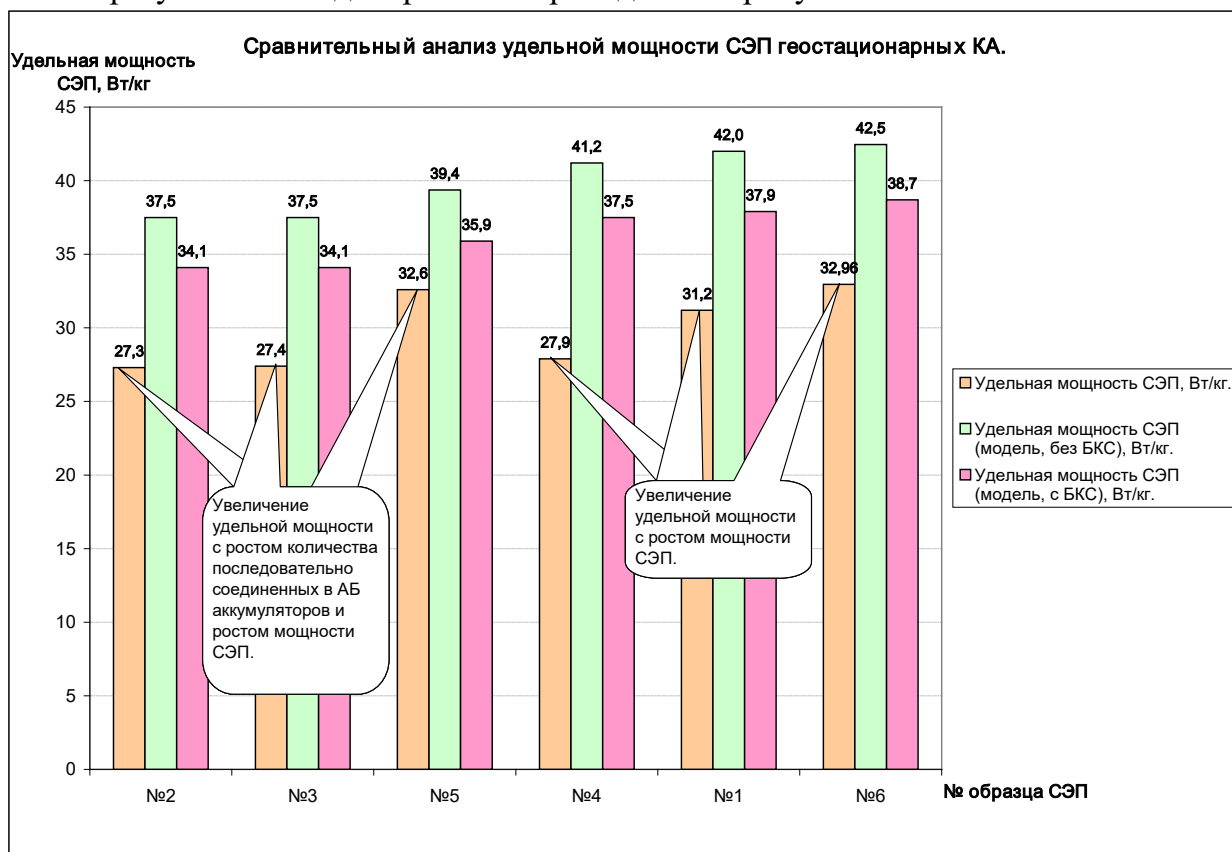


Рисунок 11 – Удельная мощность СЭП геостационарных КА

На основании приведенного анализа можно сделать вывод об адекватности разработанной методики оптимизации энергомассовых характеристик СЭП и достоверности полученных результатов.

В заключении изложены основные результаты диссертационного исследования, отражающие решение научно-технической задачи.

В приложениях А и Б представлены: копии патентов на изобретения и свидетельства на программу для ЭВМ, акты внедрения результатов работы в промышленность и в учебный процесс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрены теоретические и технические решения, направленные на повышение энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА. Выполненные исследования представлены следующими новыми результатами:

1. Предложена модульная структура СЭП геостационарного КА, позволяющая реализовать гальваническую развязку БС и АБ от нагрузки и обеспечить возможность повышения энергомассовых характеристик за счет изменения рабочих диапазонов напряжений АБ и БС для заданной мощности СЭП.
2. Разработана и используется методика оценки энергетической эффективности ЭПА, позволяющая с погрешностью до 1,5 % по критерию 3σ нормального распределения случайной величины определить параметры энергетической эффективности ЭПА различной структуры и типов силовых преобразователей для использования при расчете энергетического баланса КА.
3. Создана имитационная модель СЭП геостационарного КА в статических режимах работы, определяемых полезной нагрузкой, позволяющая осуществлять расчет энергетического баланса КА и оптимизацию энергомассовых характеристик СЭП предложенной структуры и типа силовых преобразователей ЭПА. Максимальное различие теоретических и экспериментальных данных составляет не более 3%.
4. Разработана методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП с использованием имитационной модели, позволяющая задавать требования к СЭП предложенной структуры и типа силовых преобразователей ЭПА, обеспечивающая достижение максимальной удельной мощности в заданном допустимом диапазоне изменения количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ. Методика позволяет значительно сократить временные затраты на начальных стадиях проектирования СЭП новых геостационарных КА.
5. Ожидаемый технико-экономический эффект от внедрения результатов оптимизации энергомассовых характеристик СЭП определяется возможностью введения дополнительно как минимум одного транспондера полезной нагрузки для геостационарного космического аппарата типа «Экспресс-АМ5» мощностью 13 кВт.

Научные публикации по теме диссертации:

в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Р.В. Козлов, Сравнительный анализ энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с параллельным и последовательным регулятором мощности солнечной батареи / М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Том 21, № 3. С. 98-102.
2. Р.В. Козлов Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / М.В. Нестеришин, В.Г. Букреев, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Доклады Томского Государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Том 21. № 1. С. 112-118.
3. Р.В. Козлов, Моделирование солнечных батарей космических аппаратов в программной среде SimInTech / А.М. Поляков, А.Р. Корсаков, Р.В. Козлов,

А.С. Тетерин // Научные технологии. – М.: Радиотехника, 2017. Том 18, № 12. С. 81-84.

4. Р.В. Козлов, Методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата / Р.В. Козлов, В.Г. Букреев, А.Т. Лелеков // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Том 24, № 1. С. 83-90.

Патенты

5. Р.В. Козлов, Система электропитания космических аппаратов / К.Г. Гордеев, С.Г. Кочура, Р.В. Козлов, М.В. Нестеришин, С.П. Черданцев Патент на изобретение RU 2680245 С1. Опубликовано: 19.02.2019. Бюл. № 5.
6. Р.В. Козлов, Система электропитания космического аппарата» / В.С. Кудряшов, В.О. Эльман, Р.В. Козлов [и др.] Патент на изобретение RU 2396666 С1. Опубликовано: 10.08.2010. Бюл. № 22.
7. Р.В. Козлов, Система электропитания космического аппарата / В.В. Коротких, Р.В. Козлов, М.В. Нестеришин, С.И. Опенько Патент на изобретение RU 2699084 С1. Опубликовано: 03.09.2019. Бюл. № 25.

Научные публикации в базе SCOPUS

8. Kozlov, R.V. Simulation model of spacecraft power system for power balance calculation / Kozlov, R.V., Bukreev, V.G., Nesterishin, M.V., Lelekov, A.T. // (2020) International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM, 2020-June, статья № 9153514. -Р. 340-345.

Свидетельства на программный продукт

9. Козлов Р.В. Имитационная модель системы электропитания космического аппарата в статическом режиме работы: Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020613088. Опубликовано: 10.03.2020. Бюл. № 3.

Список публикаций в трудах международных и российских конференций

10. Р.В. Козлов, Система электропитания нового поколения / С.Г. Кочура, М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов [и др.]. // Третий азиатский симпозиум по инженерии и информатике, Китай, г. Ченду, 22-25 апр. 2015 г.
11. Р.В. Козлов, Энергопреобразующая аппаратура нового поколения / В.Ю. Борисенко, Р.В. Козлов, К.В. Тараканов // Электронные и электромеханические системы и устройства: тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов, АО «НПП «Полус», г. Томск, 16-17 апр. 2015.
12. Р.В. Козлов, Моделеориентированное проектирование систем электропитания космических аппаратов / А.В. Журавлев, Р.В. Козлов, А.С. Тетерин // Решетневские чтения: материалы XVIII Международной научной конференции, Красноярск, 2014. -Т. 2. -С. 35-36.
13. Р.В. Козлов, Математическая энергобалансная модель системы электропитания низкоорбитального космического аппарата / Р.В. Козлов, М.В. Нестеришин // Электронные и электромеханические устройства: тезисы докладов XVIII научно-технической конференции, Томск, 22-23 апр. 2010.
14. Р.В. Козлов, Методика определения энергетических параметров энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / М.В. Нестеришин, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // Решетневские чтения. 2017. -Т. 1. -С. 302-303.