

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Акционерное общество

**«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
ИМЕНИ АКАДЕМИКА М.Ф. РЕШЕТНЕВА**

На правах рукописи



Козлов Роман Викторович

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

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор В.Г. Букреев

Томск – 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР И АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ СЭП, ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	14
1.1 Обзор существующих решений СЭП, постановка задачи.....	14
1.2 Методика формирования требований к СЭП.....	22
1.3 Критерий оптимизации энергомассовых характеристик СЭП.....	32
1.4 Подходы к созданию имитационных моделей СЭП.....	35
1.5 Выводы.....	39
ГЛАВА 2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЭП С УЧЕТОМ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК БС И АБ.....	40
2.1 Имитационная модель БС.....	44
2.2 Имитационная модель ЛИАБ.....	51
2.3 Имитационная модель энергетических процессов в ЭПА.....	57
2.4 Имитационная модель СЭП.....	67
2.5 Выводы.....	85
ГЛАВА 3. ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГОМАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СЭП. .	87
3.1 Формирование функций расчета массы составных частей СЭП для проведения оптимизации её энергомассовых характеристик.....	87
3.2 Оптимизация энергомассовых характеристик системы БС-БКС БС.....	101
3.3 Оптимизация энергомассовых характеристик системы АБ - БКС АБ.....	109
3.4 Методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП в целом.....	115
3.5 Алгоритм оптимизации энергомассовых характеристик СЭП.....	121
3.6 Выводы.....	132

ГЛАВА 4. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛИ СЭП.....	133
4.1 Испытания БС и результаты подтверждения адекватности модели БС экспериментальным данным.....	135
4.2 Испытания ЛИАБ и результаты подтверждения адекватности модели АБ экспериментальным данным.....	140
4.3 Испытания ЭПА и результаты подтверждения адекватности энергетической модели ЭПА экспериментальным данным.....	146
4.4 Оценка адекватности результатов расчета оптимальных параметров СЭП геостационарного КА по экспериментальным данным.....	154
4.5 Выводы.....	161
Заключение.....	162
Перечень терминов, сокращений и обозначений.....	164
Литература.....	166
Приложения.....	177

Введение

Актуальность темы. Разработка систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) осуществляется по критерию экстремума энергомассовых характеристик. Это условие предполагает, что при заданных требованиях к СЭП в части срока активного существования, уровней внешних воздействий и требуемой мощности полезной нагрузки и служебных систем масса системы должна быть минимальной.

Максимальная масса КА, которую возможно вывести на целевую орбиту, обратно пропорциональна высоте орбиты. Поэтому стоимость вывода КА на геостационарную орбиту (36 тыс. км) является максимальной, 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 настоящее время в составе космических аппаратов (КА) различного назначения широко применяются системы электропитания (СЭП) параллельной или последовательно-параллельной структурной схемы, в состав которых входит энергопреобразующая аппаратура (ЭПА) 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, хорошо изучены.

Вместе с тем в настоящее время наблюдается рост научно-технического интереса к разработке ЭПА с применением регуляторов, работающих в резонансных режимах работы. В частности, рассматриваются вопросы создания СЭП с ЭПА на базе мостовых резонансных инверторов. К преимуществам регуляторов ЭПА на базе мостовых резонансных инверторов, которые позволяют повысить энергомассовые характеристики СЭП, относят: снижение уровня генерируемых СЭП помех, снижение массы выходных фильтров ЭПА за счет повышения частоты коммутации ключевых элементов, исключение силовых коммутаторов подключения БС и АБ и т.д.

Наряду с известными преимуществами СЭП с ЭПА на базе мостовых резонансных инверторов открывает новые возможности в области исследования путей повышения удельных энергомассовых характеристик СЭП КА за счет изменения параметров межблочного силового интерфейса СЭП, т.е. за счет варьирования диапазонами рабочих напряжений АБ и БС.

Поэтому теоретические исследования возможности повышения энергомассовых характеристик СЭП геостационарных КА с ЭПА на базе мостовых резонансных инверторов, а также разработка практических рекомендаций по оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарных КА являются актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности

Значительный вклад в повышение энергомассовых характеристик СЭП КА сделан следующими инженерами и учеными: М.Ф. Решетнев, В.И. Иванчура, Г.Д. Эвенов, В.С. Кудряшов, А. Б. Базилевский, М.Б. Каган, М.В. Лукьяненко, Б.П. Соустин, 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), ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ Прогресс» (г. Самара), ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» (г. Химки), РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (г. Королев), НИИАИ «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 на рассматриваемую тему зарубежных и отечественных работ, а также объективная необходимость повышения энергомассовых характеристик СЭП геостационарных КА свидетельствует об устойчивом научном и инженерном интересе к вопросам в этом направлении.

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 ее 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. Определены 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, типа и состава составных частей СЭП.
6. Сформулированы рекомендации для разработки технического задания нового поколения системы электропитания СЭП.

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 «Полюс» 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 с применением в качестве силовых преобразователей ЭПА мостовых резонансных инверторов с гальванической трансформаторной развязкой АБ и БС от нагрузки, обеспечивающих этим

возможность независимого варьирования в некоторых пределах диапазонами рабочих напряжений БС и АБ с сохранением параметров энергетической и энергомассовой эффективности;

- разработана методика оценки энергетической эффективности ЭПА, обеспечивающая аппроксимацию нелинейной зависимости КПД ЭПА 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, позволяющая реализовать функции преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС, заряда АБ в квазипотенциостатическом режиме, с возможностью масштабирования модели 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 заключается в следующем:

- 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, реализующая в пакете Matlab Simulink имитационную модель СЭП и позволяющая исследовать энергетические процессы в СЭП в статических режимах работы с возможностью масштабирования количественного состава элементов СЭП и применения численных методов для определения параметров СЭП для достижения оптимальных значений энергомассовых характеристик СЭП.

Научные положения, выносимые на защиту:

- структура системы электропитания, позволяющая реализовать гальваническую развязку солнечной и аккумуляторной батарей от электрической нагрузки и обеспечить возможность улучшения ее энергомассовых характеристик за счет оптимизации рабочих диапазонов напряжений БС и АБ для заданной мощности СЭП;
- 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 [26-28] рассмотрены и предложены варианты структурных схем СЭП; в публикациях [55, 67, 70] разработаны и сформулированы положения методики оценки энергетической эффективности ЭПА; в публикациях [71, 87] разработана и подтверждена адекватность имитационной модели СЭП; в публикации [86] 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 «Полюс», г. Томск, 2020 г.), XX научно-техническая конференция молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства» (АО «НПЦ «Полюс», г. Томск, 2018 г.), XXI международная конференция 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 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

В первой главе рассмотрены структурные схемы и типы силовых преобразователей энергопреобразующей аппаратуры СЭП геостационарных КА. Показаны преимущества разработанных структурных схем СЭП КА, где в качестве силовых преобразователей применяются мостовые резонансные инверторы. Отмечено, что данные СЭП позволяют осуществлять оптимизацию энергомассовых характеристик за счет изменения количества последовательно и параллельно соединенных элементов в БС и АБ. Рассмотрена известная методика формирования требований к СЭП, основанная на выполнении расчета энергетического баланса КА. Сформулирован критерий оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА. Рассмотрены известные имитационные модели СЭП КА. Сформулированы требования к разработке имитационной модели СЭП КА как к инструменту расчета энергетического баланса КА, обеспечивающей возможность проведения оптимизации энергомассовых характеристик СЭП.

Во второй главе разработана имитационная модель СЭП в статических режимах работы, обеспечивающая возможность расчета энергетического баланса КА с учетом нестационарности характеристик БС и АБ, возможности масштабирования количественного состава элементов БС и АБ, заряда АБ в квазипотенциостатическом режиме, обеспечения преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС. Разработана и применена в имитационной модели СЭП методика оценки параметров энергетической эффективности ЭПА в виде линейной модели. Обоснована эквивалентность параметра энергетической эффективности ЭПА – КПД и вновь введенных параметров энергетической эффективности ЭПА: «коэффициент передачи мощности» и «собственное потребление».

В третьей главе сформулированы функции расчета массы элементов СЭП для проведения оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА. Исследованы возможности оптимизации подсистемы СЭП, состоящей из БС и бортовой кабельной сети (БКС) БС, а также подсистемы СЭП,

состоящей из АБ и БКС АБ. Установлено, что с ростом количества последовательно соединенных фотопреобразователей в БС удельная мощность системы БС – БКС БС растет с возможным образованием локальных экстремумов. Установлено, что существует область значений количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, для которой удельная энергия системы АБ – БКС АБ максимальна. Разработана методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП с использованием имитационной модели СЭП. Получены поверхности удельной мощности СЭП геостационарного КА, зависящие от количества последовательно соединенных элементов в БС и АБ. Показано, что разработанная методика обеспечивает нахождение экстремума энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА в заданном диапазоне изменения последовательно соединенных элементов в БС и АБ. Сформированы предложения по оптимальным параметрам СЭП геостационарных КА, соответствующим максимальному значению удельной мощности СЭП.

В четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований. Подтверждена адекватность имитационной модели СЭП по результатам испытаний опытных образцов БС, АБ и ЭПА. Приведено используемое при проведении испытаний оборудование. Исследована адекватность оценки энергомассовых характеристик СЭП по предложенной методике в сравнении с энергомассовыми характеристиками известных образцов СЭП геостационарных КА. Показано, что полученные по предложенной методике значения энергомассовых характеристик СЭП коррелируют со значениями энергомассовых характеристик реальных образцов СЭП.

В заключении представлены основные результаты диссертационного исследования.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.т.н., профессору Букрееву Виктору Григорьевичу, а также начальнику отдела разработки бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «ИСС» Нестеришину Михаилу Владленовичу и к.т.н. Лелекову Александру Тимофеевичу за всестороннюю поддержку и консультации по теме диссертационной работы.

Глава 1. Обзор и анализ существующих решений в области СЭП геостационарных КА, постановка задачи исследований

1.1 Обзор существующих решений СЭП, постановка задачи

Системы электропитания космических аппаратов предназначены для генерации и хранения на борту КА электрической энергии и осуществления электропитания оборудования и систем КА электрической энергией заданного качества в течение всего срока активного существования (САС) [1].

Эволюцию СЭП КА можно проследить, рассматривая их структурно-функциональные схемы. Так, одной из первых СЭП, использующих в качестве первичного и вторичного источников энергии солнечные и аккумуляторные батареи, была СЭП, построенная по структурной схеме БКИП (блок контроля источников питания) [2]. Структурная схема СЭП данного типа представлена на рисунке 1.1.

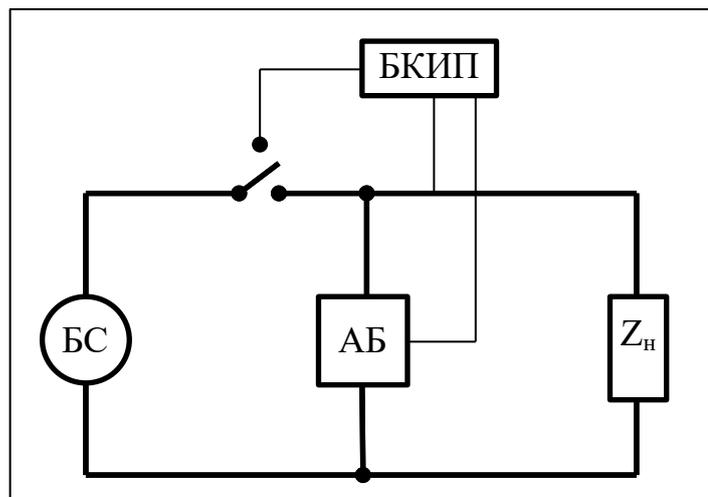


Рисунок 1.1 – Структурная схема СЭП по типу БКИП: Z_n – нагрузка; БКИП – блок контроля источников питания; БС – батарея солнечная; АБ – батарея аккумуляторная

Регулирование выходного напряжения в данной СЭП осуществлялось за счет подключения и отключения БС к общей шине БС-АБ-нагрузка. Недостатками такой СЭП являлись: большое количество циклов заряд-разряд АБ; невозможность обеспечения стабилизированного напряжения выходной шины

СЭП; невозможность использования всей мощности БС в точке максимальной мощности ее вольт-амперной характеристики.

Необходимость повышения САС КА, а также энергомассовых характеристик СЭП и КА в целом привели к развитию и разработке энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) СЭП, в состав которой входят повышающие и понижающие ШИМ преобразователи [3]. Структурные схемы СЭП с применением ЭПА на основе ШИМ преобразователей представлены на рисунке 1.2.

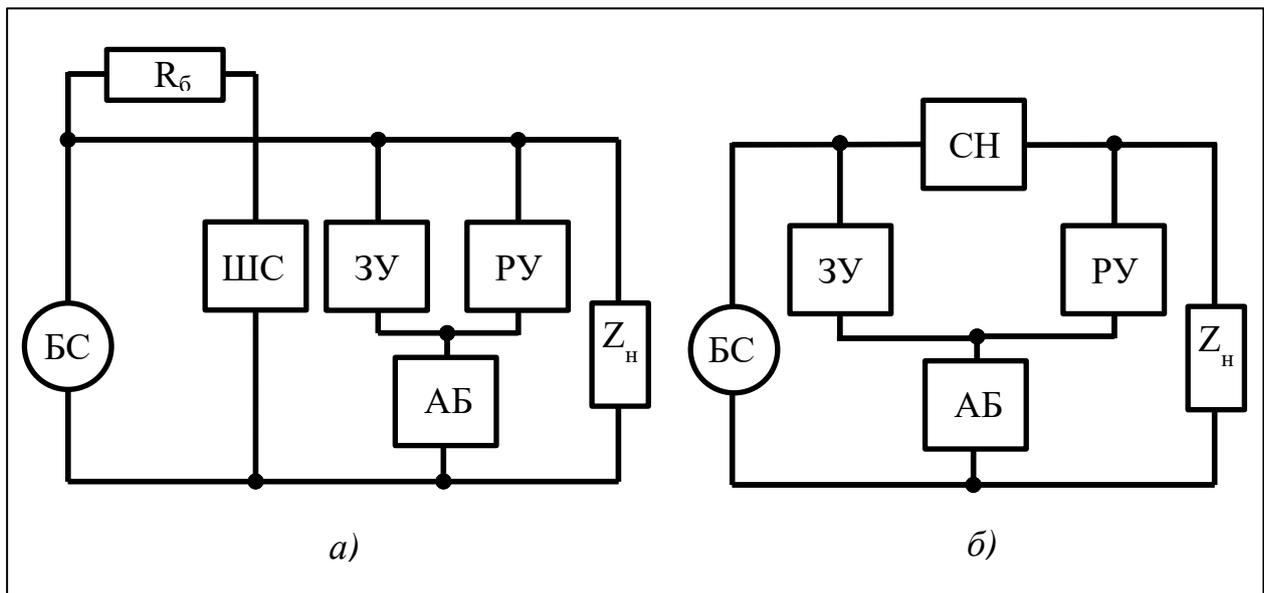


Рисунок 1.2 – Структурные схемы СЭП

а) – параллельного типа с балластным резистором;

б) – последовательно параллельного типа

Обе структурные схемы содержат зарядные и разрядные устройства (ЗУ и РУ) и отличаются исполнением силового регулятора мощности БС. В качестве данного регулятора используется шунтовой стабилизатор (ШС), подключаемый к БС параллельно (рис. 1.2, *а*), либо последовательный понижающий стабилизатор (СН), подключаемый к БС последовательно (рис. 1.2, *б*).

Системы электропитания с применением ЭПА на основе ШИМ преобразователей лишены недостатков, присущих схемам БКИП, и обеспечивают формирование выходных шин со стабильным напряжением, минимизацию циклов разряд-заряд аккумуляторных батарей и возможность использования максимальной мощности БС в точке экстремума ее вольт-ваттной характеристики

(для схемы с последовательным регулятором мощности БС). Основным преимуществом СЭП, разработанных по схеме последовательного и параллельного регуляторов мощности БС, является минимизация количества циклов разряд-заряд АБ, что позволяет существенно продлить ресурс СЭП и КА в целом.

Области рационального применения СЭП, разработанных в соответствии со структурной схемой рис. 1.2, различны. Так, СЭП, разработанная по структурной схеме с последовательным типом регулятора мощности БС, обладает более низким уровнем энергетической эффективности в конце САС за счет неизбежных статических и динамических потерь в последовательном регуляторе. Вместе с тем данная СЭП обеспечивает возможность осуществления экстремального регулирования мощности БС, что обуславливает ее эффективное применение в составе низкоорбитальных КА с неориентируемыми солнечными батареями, которые находятся в различных условиях освещенности. Системы электропитания с шунтовым регулятором мощности БС обладают более высоким уровнем энергетической эффективности в конце САС. Параметры БС при проектировании СЭП подбираются таким образом, чтобы в конце САС напряжение в точке максимальной мощности на вольт-амперной характеристике БС соответствовало выходному напряжению СЭП. Поскольку при равенстве мощностей нагрузки и БС ключи шунтового регулятора мощности БС полностью закрыты, потери энергии на регулирование отсутствуют, что позволяет снизить требуемую мощность солнечной батареи. В связи с этим применение СЭП, выполненных по структурной схеме с параллельным типом регулятора мощности БС, целесообразно для долгоресурсных КА с постоянной мощностью нагрузки.

В качестве характерного примера СЭП, в составе которой применяется ЭПА с последовательным регулятором мощности БС, можно назвать СЭП КА разработки АО «ИСС»: «Молния-3К», «Глобус», «Экспресс», «Гонец-М», «Глонасс-М», «Глонасс-К» и другие [4]. Вариант структурной схемы СЭП последовательно-параллельного типа, который используется для разработки СЭП

в настоящее время и реализован, например, в СЭП КА «Глонасс-К2», представлен на рисунке 1.3.

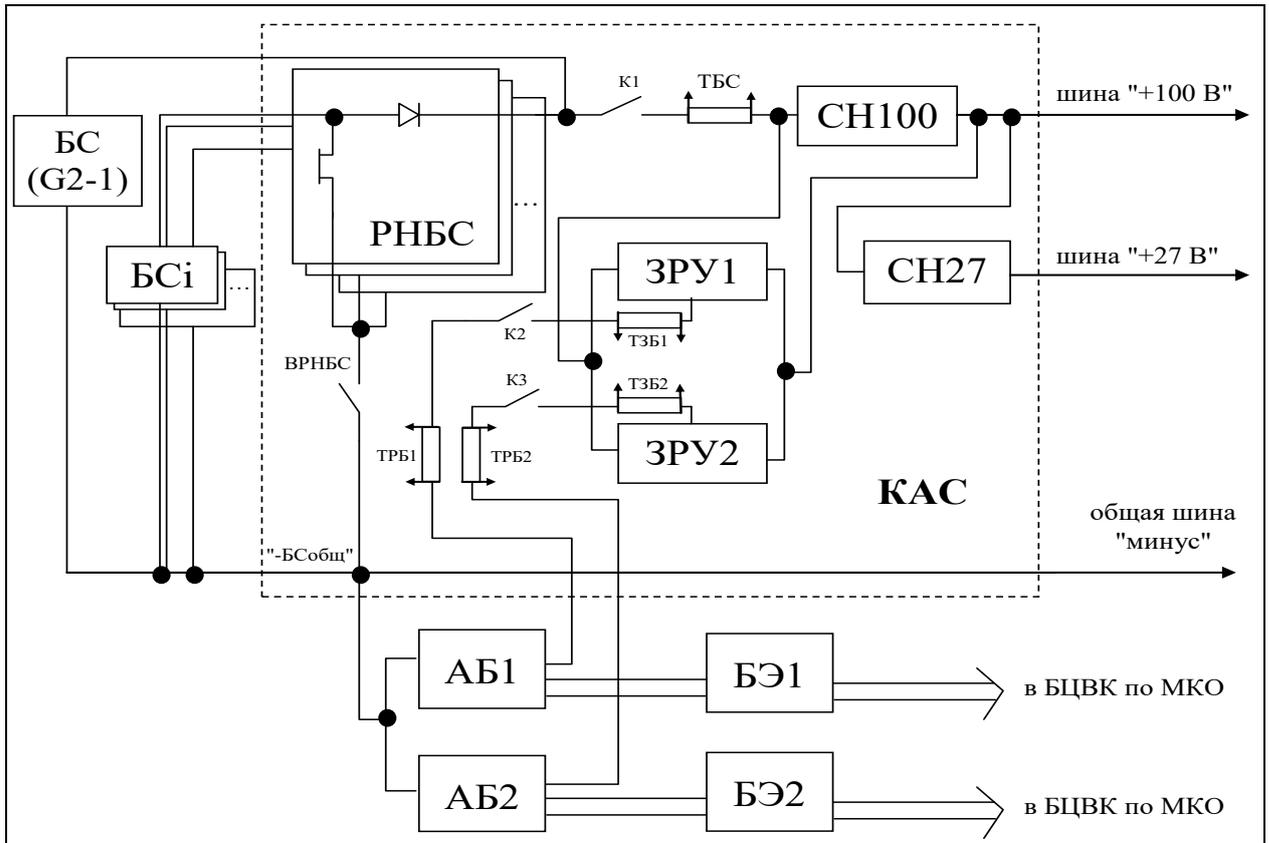


Рисунок 1.3 – Структурная схема СЭП КА «Глонасс-К2»

Системы электропитания с шунтовыми регуляторами мощности БС нашли широкое применение в составе КА, эксплуатирующихся на геостационарных орбитах с постоянной циклограммой нагрузки и точной ориентацией панелей БС на Солнце. Развитие и совершенствование электронной компонентной базы и схемотехнических решений привело к исключению из состава ЭПА с шунтовым регулятором мощности БС балластного сопротивления и разработке секционированных шунтовых преобразователей. Большое распространение получили схемы с применением S3R (Sequential Switching Shunt Regulator), также развивается направление S4R (Sequential Switching Shunt Series Regulator) регуляторов [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]. Системы электропитания с параллельным типом регулирования мощности БС, реализованным в виде S3R регулятора, применяются, например, в СЭП космических платформ SpaceBus 3000 и SpaceBus 4000 [10]. Структурная схема СЭП с применением в составе ЭПА регулятора S3R показана на рисунке 1.4.

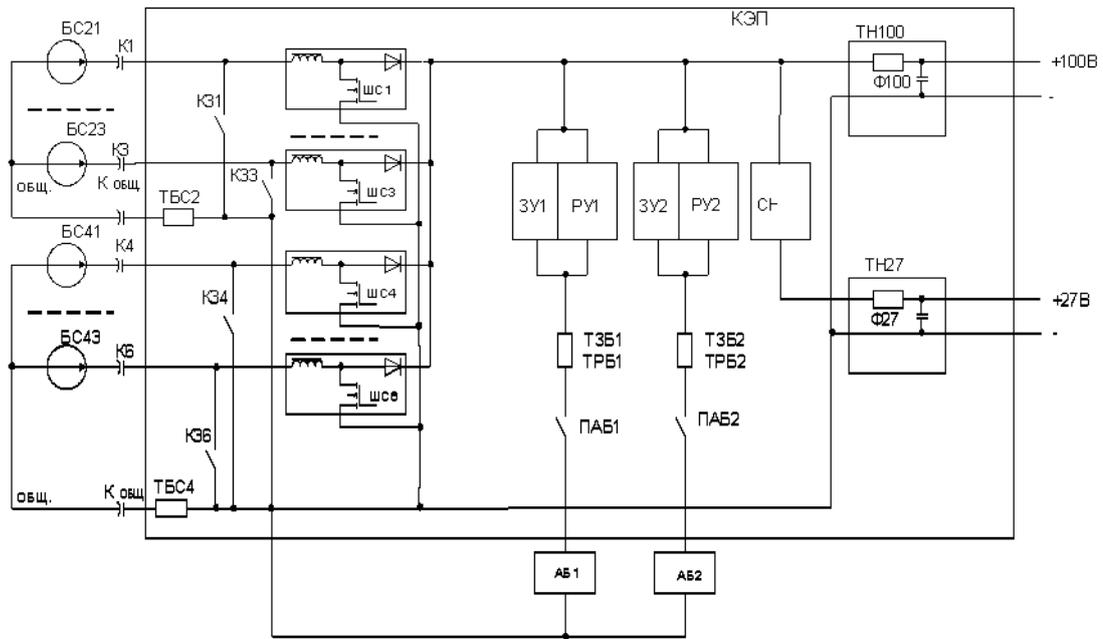


Рисунок. 1.4 – Структурная схема СЭП с ШС, выполненным в виде регулятора S3R

Еще одним направлением развития структурно-функциональных схем СЭП космических аппаратов является применение в составе ЭПА силовых регуляторов, построенных по схеме последовательного мостового резонансного инвертора. Схемотехнические решения последовательных мостовых резонансных инверторов достаточно хорошо исследованы и описаны как в зарубежной, так и в отечественной научно-технической литературе [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]. Вместе с тем возможность и конкретные варианты применения данных схемотехнических решений для разработки силовых энергопреобразующих модулей ЭПА систем электропитания КА стали рассматриваться только после 2000 года. Об этом свидетельствует как диссертационная активность [21, 22], так и публикации в сборниках трудов научно-технических конференций предприятий космической промышленности [23, 24, 25].

В частности, получены патенты на изобретения СЭП космических аппаратов, где силовые преобразователи выполнены по схеме мостовых резонансных инверторов [26, 27, 28]. Основные недостатки СЭП, разработанных с применением ЭПА параллельной или последовательно-параллельной структуры на базе силовых повышающих и понижающих преобразователей, указаны в данных патентах. Этими недостатками являются:

- необходимость разработки новой системы электропитания с кардинальной переработкой источников тока – солнечной и аккумуляторной батарей – в случае перехода на новый номинал напряжения питания бортовой аппаратуры КА (например: 27В, 40В, 70 В, 100 В);
- низкая помехозащищенность потребителей электроэнергии на борту КА, что объясняется наличием гальванической связи между шинами питания аппаратуры и источниками тока в СЭП;
- низкая функциональная надежность СЭП в случае, если ЭПА СЭП построена без использования модульной структуры [28, 29].

Структурная схема модульной СЭП с силовыми преобразователями по схеме мостовых резонансных инверторов показана на рисунке 1.5.

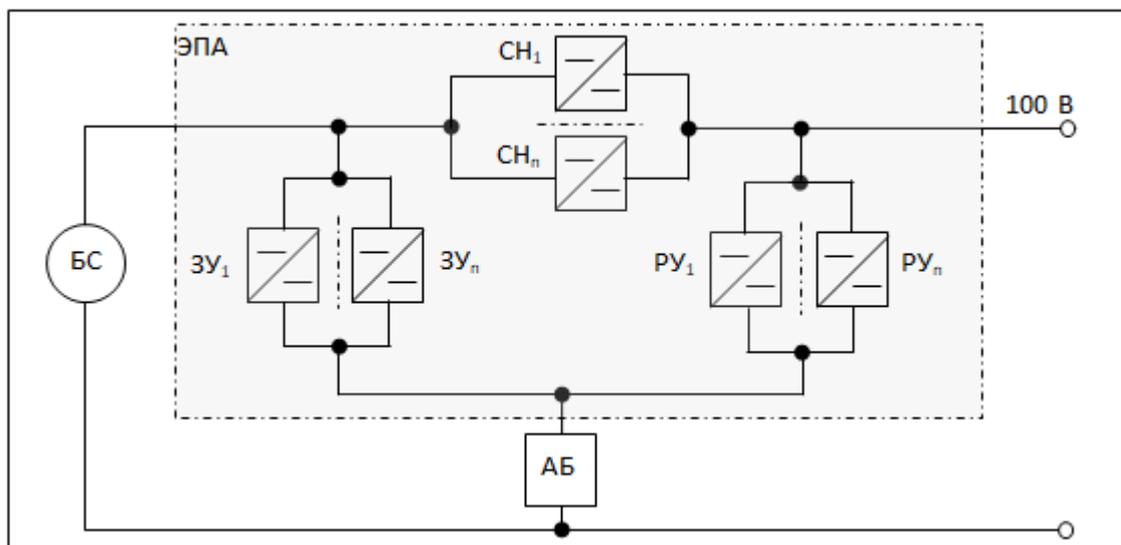


Рисунок 1.5 – Структурная схема СЭП [28] с силовыми преобразователями ЭПА в виде мостовых резонансных инверторов

Преимуществами применения разработанной СЭП [28] являются модульная структура, т.е. возможность обеспечивать требуемую выходную мощность СЭП необходимым количеством параллельно соединенных силовых модулей СН, ЗУ и РУ некоторой единичной мощности, а также возможность задания требований к диапазону рабочего напряжения БС и АБ независимо от значения номинала (или номиналов) выходного напряжения ЭПА.

Действительно, рассматривая СЭП параллельной или последовательно-параллельной структуры с применением силовых преобразователей без

гальванической развязки (например, S3R), легко убедиться, что диапазон рабочих напряжений БС необходимо выбирать таким, чтобы в худших условиях эксплуатации в конце САС напряжение БС было равно напряжению нагрузки. В этом случае энергетическая эффективность регулятора мощности БС будет максимальной, поскольку потери на регулирование будут практически отсутствовать. Применение же в качестве силовых преобразователей ЭПА мостовых резонансных конвертеров снимает это ограничение, поскольку максимальная энергетическая эффективность будет достигаться при определенном (настраиваемом) значении напряжения АБ или БС, которое не обязательно должно совпадать со значением номинала выходного напряжения ЭПА. При этом номинальное (установившееся) значение выходного напряжения ЭПА может как выше или ниже, так и находиться внутри диапазона рабочих напряжений БС и АБ.

Таким образом, предложенная СЭП открывает новые возможности в области исследования путей повышения удельных энергомассовых характеристик СЭП КА за счет изменения параметров межблочного силового интерфейса СЭП, т.е. за счет варьирования диапазонами рабочих напряжений АБ и БС.

Следует отметить, что применение в составе ЭПА мостовых резонансных инверторов открывают возможность для повышения удельной мощности ЭПА в первую очередь за счет повышения рабочей частоты преобразователей. Вместе с тем на практике рабочая частота данных преобразователей ограничена, что обусловлено технологическими проблемами в получении требуемых характеристик радиационно - стойких ЭКБ и материалов космического применения. В связи с этим в настоящей работе рассматривается ЭПА с резонансными преобразователями, разрабатываемая в рамках опытно-конструкторских работ АО «НПЦ «Полюс» и АО «ИСС» и уже оптимизированная по критерию наилучшей энергомассовой эффективности [24, 25, 75].

В целом задача повышения энергомассовых характеристик СЭП КА является одной из основных задач при проектировании СЭП [1, 2]. Её решение

особенно актуально для долгоресурсных КА, предназначенных для функционирования на геостационарной орбите (ГСО).

Действительно, масса СЭП составляет существенную долю массы космического аппарата [30]. При этом улучшение удельных энергетических характеристик СЭП приводит к возникновению синергетического эффекта, когда одновременно увеличиваются доступные для полезной нагрузки ресурсы массы и энергопотребления, что повышает эффективность КА в целом.

Современные СЭП КА обладают удельной мощностью на уровне от 25 до 32 Вт/кг [31], что при мощности полезной нагрузки 10 кВт дает массу системы 400 кг. Также стоит отметить, что стоимость одного килограмма массы СЭП с учетом вывода геостационарную орбиту аппарата может быть оценена в 53 тыс. долларов США [32]. Поэтому снижение массы СЭП геостационарного КА всего на 1 % дает снижение стоимости миссии на 212 тыс. долларов США. Поэтому при разработке СЭП, в особенности для геостационарных КА, наибольшее внимание уделяется поиску способов снижения массы СЭП.

Таким образом, исследование возможности повышения удельных энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА с ЭПА, в составе которой в качестве силовых преобразователей применены мостовые резонансные инверторы, является актуальной научно-технической задачей.

1.2 Методика формирования требований к СЭП

Подходы к формированию требований к СЭП КА с той или иной степенью подробности рассмотрены как в отечественной, так и в зарубежной литературе [1, 2, 30, 32, 33]. В целом формирование требований к СЭП является итерационным процессом, на каждом этапе которого формируются все более детальные качественные и количественные требования с целью обеспечить выполнение целевой функции СЭП.

Формирование требований к СЭП КА осуществляется с использованием энергобалансного подхода. Такой подход означает, что параметры СЭП должны быть такими, чтобы гарантированно удовлетворять требованию соблюдения положительного энергетического баланса КА во всех режимах его функционирования в течение всего САС.

Критериями положительного энергобаланса являются:

- положительный запас энергии между энергоёмкостью комплекта АБ и суммарным энергопотреблением БА КА от начала режима до устойчивого перехода в режим энергопитания от солнечной батареи - в режимах, когда энергетическое обеспечение КА выполняется от комплекта АБ, т.е. отсутствует гарантированная ориентация БС на Солнце (начальные режимы, режим обеспечения живучести);
- положительный запас энергии между зарядной и разрядной энергией комплекта АБ - в режимах, когда энергетическое обеспечение КА выполняется в основном от БС и при необходимости дополняется разрядом комплекта АБ (режим начальной ориентации на Землю, режим ориентации на Землю, штатная работа по программе типового витка, режим коррекции приведения, режим коррекции удержания).

Кроме того, для гарантированного обеспечения положительного энергобаланса КА применяются следующие запасы по мощности на уровне системы электропитания и КА в целом:

- на уровне КА устанавливается 5 %-й запас по мощности энергопотребления бортовой аппаратуры КА;
- дополнительно, на уровне СЭП, устанавливается:
 - 5% -й запас по мощности солнечной батареи, относительно уровня мощности, необходимого для энергетического обеспечения КА в режимах с наибольшим энергопотреблением с учётом мощности, необходимой для заряда комплекта АБ;
 - 5% -й запас по энергоёмкости комплекта аккумуляторных батарей, относительно уровня энергопотребления, необходимого для энергетического обеспечения КА в режимах с наибольшим энергопотреблением от комплекта аккумуляторных батарей.

Методология управления запасами заключается в следующем:

- в процессе опытно-конструкторских работ (ОКР), по результатам проведения проектных расчётов и испытаний образцов бортового оборудования начальные значения энергопотребления бортового оборудования изменяются на уточнённые (реально измеренные) значения;
- по завершении соответствующих этапов ОКР (техническое проектирование, наземная экспериментальная отработка (НЭО) оборудования, НЭО КА) выполняется при необходимости снижение уровня проектных запасов до значения $1 \div 3\%$.

Методика формирования требований к СЭП состоит в декомпозиции требований назначения к космическому аппарату и расчету параметров СЭП, удовлетворяющих условию положительного энергетического баланса КА. Для этого выполняются следующие основные действия.

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: энергетическая эффективность, отработанность технических решений, наличие опытных образцов или прототипов оборудования СЭП.
3. Осуществляется 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/м^2 ; кг/м^2) и энергоемкости АБ ($\text{Вт}\cdot\text{ч/кг}$).
4. Формируется 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. Осуществляется расчет энергетического баланса КА, результатом которого являются расчетные значения необходимой мощности БС, энергоемкости АБ и требуемой выходной мощности ЭПА.
7. Осуществляется 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 формирования требований к СЭП возможен возврат к предыдущим пунктам и их повторное выполнение в случае, если первоначальные оценки каких-либо характеристик привели к неудовлетворительному результату.

В качестве исходных данных для расчета энергетического баланса КА принимаются характеристики и параметры, основные из которых представлены в таблице 1.1. В таблице 1.1 обозначены параметры, определение которых является целью расчета энергетического баланса КА. Этими параметрами выступают мощность БС и энергоёмкость АБ.

Таблица 1.1 – Исходные данные для расчета энергетического баланса геостационарного КА

Параметр	Обозн.	Знач.
<u>Солнечная батарея:</u>		
1. Выходная мощность БС, Вт, (конец ресурса, стандартная освещённость)	$P_{БС}$...
2. Удельная мощность, Вт/м ² , не менее	Руд	260
3. Коэффициент точности ориентации панелей БС на Солнце (5°)	K_{OP}	0,996
4. Сезонные коэффициенты ГСО:	$K_{СЕЗ}$	0,967
• осеннее равноденствие (22 сентября)	$K_{АЕ}$	0,989
• летнее солнцестояние (24 июня)	K_{SS}	0,885
<u>Аккумуляторная батарея:</u>		
1. Энергоёмкость комплекта, Вт×ч, не менее	$E_{АБ}$...
2. Энергетический к.п.д. АБ по циклу заряд-разряд	$K_{АБ}$	0,95
3. Удельная энергоёмкость АБ, Вт×ч/кг	$E_{АБ уд}$	100

Параметр	Обозн.	Знач.
<u>Энергопреобразующая аппаратура:</u>		
1. К.п.д СН по шине «100 В»	K_{CH100}	0,97
2. К.п.д СН по шине «27 В»	K_{CH27}	0,95
3. К.п.д зарядного устройства	$K_{ЗУ}$	0,95
4. К.п.д разрядного устройства	$K_{РУ}$	0,97
<u>Элементы силовой кабельной сети:</u>		
1. К.п.д. БКС от СЭП до нагрузки «100 В» ($\Delta U \sim 1,0$ В)	$K_{БКCH100}$	0,990
2. К.п.д. БКС от СЭП до нагрузки «27 В» ($\Delta U \sim 1,0$ В)	$K_{БКCH27}$	0,963
3. К.п.д. БКС от БС до ЭПА ($\Delta U \sim 3,5$ В)	$K_{БКБС}$	0,968
4. К.п.д. силового токосъёмника ($\Delta U \sim 1,0$ В)	$K_{ПБС}$	0,991
5. К.п.д. БКС от АБ до КАС ($\Delta U \sim 0,7$ В)	$K_{БКБС АБ}$	0,991
<u>Длительность интервалов времени:</u>		
1. Виток, час (24 ч)	$T_{ВИТ}$	24
2. Тень Земли, час (72 мин)	$T_{ТУЗ}$	1,2
3. Режим коррекции удержания (РКУ), час	$T_{РКУ}$	3
4. Переход в РАСО (45 мин), час	$T_{РАСО}$	0,75
5. Переход в РАСО с прохождением ТУЗ максимальной длительности, час	$T_{P_T_P}$	2,87
<u>Запасы по мощности:</u>		
1. Запас по мощности энергопотребления нагрузки	$K_{ЗН}$	1,05
2. Запас по мощности солнечной батареи	$K_{ЗБС}$	1,05
3. Запас по энергоёмкости комплекта АБ	$K_{ЗАБ}$	1,05

Выбор и обоснование расчетных случаев при расчете энергетического баланса КА в целом зависит от его целевого назначения, которое определяет циклограмму нагрузки. Основной целевой сферой использования геостационарных КА является предоставление услуг связи и непосредственного телевидения и ретрансляции данных. Это определяет характер циклограммы нагрузки геостационарных КА как практически постоянный со значением мощности нагрузки близким к максимальному. При этом для удержания заданного орбитального положения КА проводятся режимы коррекции удержания с включением электрореактивной двигательной установки (ЭРД). Качественно,

циклограмма нагрузки геостационарного КА может быть представлена, как показано на рисунке 1.6.

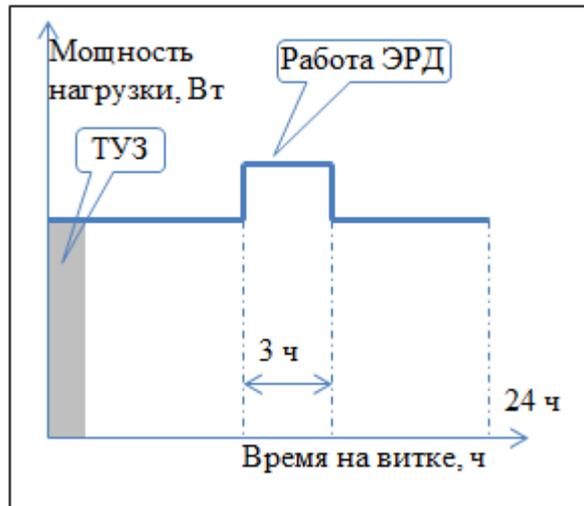


Рисунок 1.6 – Типовая циклограмма нагрузки геостационарного КА
 Примеры реальных циклограмм нагрузки при работе КА по программе типового витка приведены на рисунках 1.7, 1.8.

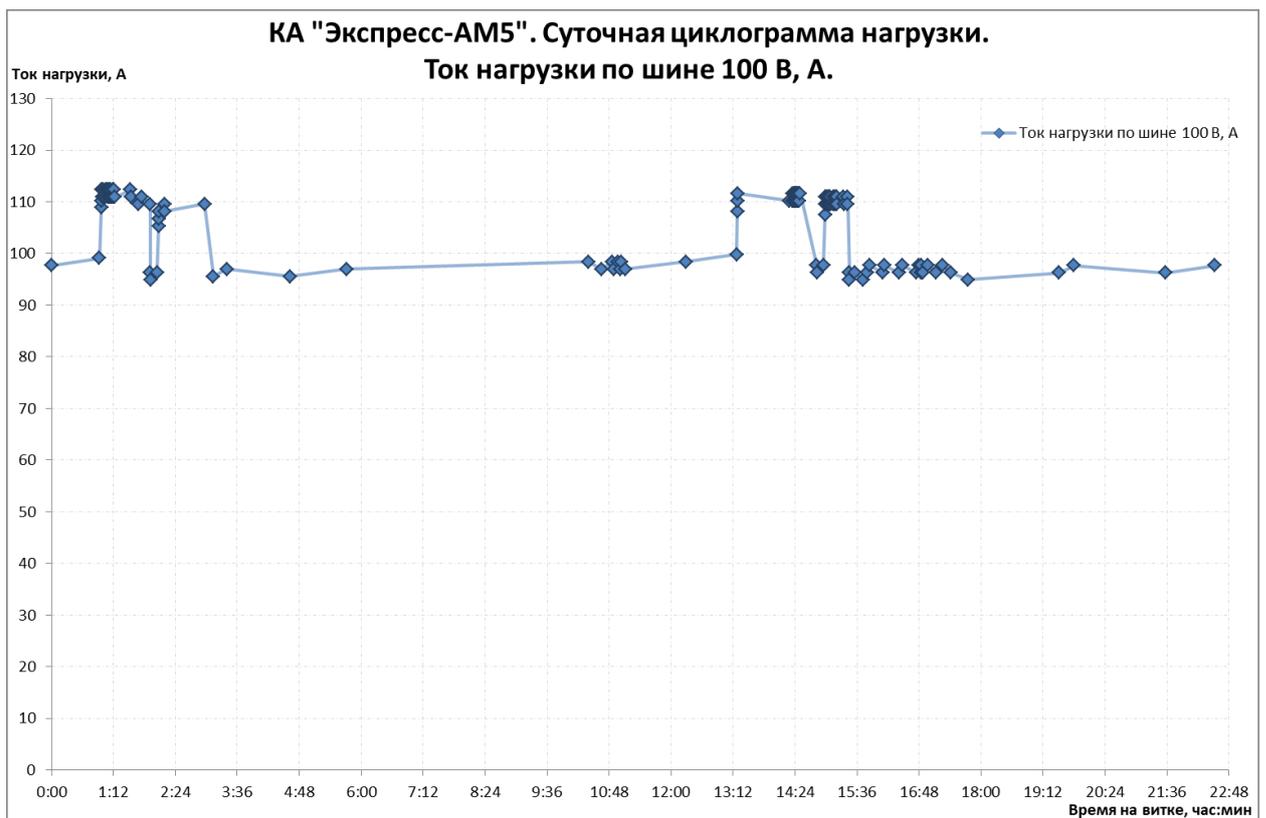


Рисунок 1.7 – Циклограмма нагрузки геостационарного КА «Экспресс-AM5»

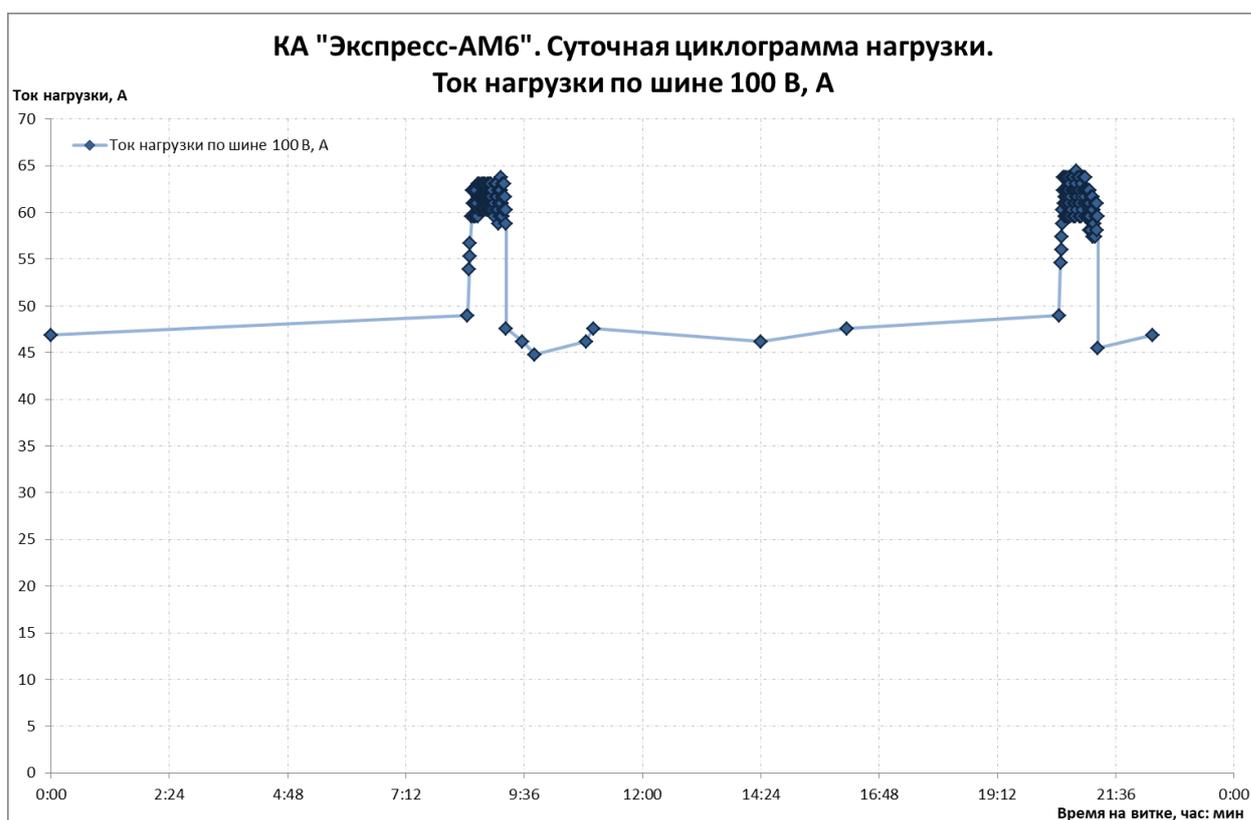


Рисунок 1.8 – Циклограмма нагрузки геостационарного КА «Экспресс-АМ6»

На рисунках 1.7, 1.8 видно, что нагрузка геостационарного КА практически постоянна, а увеличение нагрузки на 1,5 кВт на три часа на витке происходит в периоды проведения коррекции удержания КА в заданной орбитальной позиции. На графиках рис. 1.7 и 1.8 показаны так называемые «существенные» значения тока нагрузки, когда новое значение тока фиксируется только тогда, когда оно изменяется на некоторую заданную величину (обычно единицы или доли ампера).

В качестве наиболее энергонапряженного режима, который определяет требования к СЭП, выбирают режим работы КА по программе типового витка с циклограммой нагрузки согласно рис. 1.6 с прохождением теневого участка Земли максимальной длительности. Условие положительного энергетического баланса в этом случае записывают в виде неравенства (1.1):

$$E_{\text{ЗАР}} \geq \frac{E_{\text{РАЗР}}}{K_{\text{АБ}}}, \quad (1.1)$$

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. Конкретные уравнения расчета зарядной и разрядной энергии комплекта АБ определяются выбранной структурной схемой СЭП и хорошо описаны [1, 2, 32, 33].

Для согласования межблочного силового интерфейса СЭП должны выполняться следующие условия:

- значение минимального выходного напряжения источника энергопитания должно быть всегда больше значения нижней границы входного напряжения энергопитания, при котором потребитель энергии сохраняет работоспособность;
- значение максимального выходного напряжения источника энергопитания должно быть всегда меньше значения верхней границы входного напряжения энергопитания, при котором потребитель энергии сохраняет работоспособность;
- значение предельного/максимального тока устройства, ограничивающего ток по шине, должно быть всегда меньше, чем значение допустимого максимального тока остальных устройств шины, при котором потребители тока сохраняют работоспособность.
- для зарядного устройства значение максимального выходного напряжения (холостого хода) выше максимально возможного зарядного напряжения АБ, чем обеспечивается гарантированное прохождение тока заряда АБ. Безаварийная работа контура обеспечивается аппаратным ограничением тока зарядного устройства (при этом напряжение на зарядной шине определяется аккумуляторной батареей) и прекращением заряда в соответствии с алгоритмом заряда.

Следует отметить, что реализация приведенной методики определения требований к СЭП геостационарного КА может быть различной как по составу

применяемых средств и методов расчета, так и в части детализации определения и использования характеристик составных частей СЭП.

В частности, в рассмотренных источниках, с одной стороны, указывается, что параметры энергетической эффективности ЭПА (КПД) зависят от значений входных напряжений силовых преобразователей, которые определяются значениями рабочих напряжений БС и АБ. Однако в расчетах используется некоторое фиксированное значение КПД. То же относится и к характеристикам БС и АБ, которые в расчетах принимаются как стационарные. Также показано воздействие условий орбитального функционирования характеристики БС и АБ. Воздействие условий освещенности и текущей нагрузки БС приводит к изменению текущей формы ее вольт-амперной характеристики (ВАХ). Так, в работе [22] продемонстрирован учет изменения формы ВАХ фотопреобразователя из-за изменения его температуры при изменении освещенности. Однако температура фотопреобразователя изменяется не только из-за изменений условий освещенности, но и из-за изменения текущей мощности, отбираемой от фотопреобразователя в нагрузку.

Отсутствие учета нестационарности характеристик АБ в процессе орбитального функционирования СЭП также приводит к погрешностям в формировании требуемых характеристик составных частей СЭП. Так, при разряде и заряде литий-ионных АБ рабочее напряжение АБ изменяется в достаточно широких пределах (рабочий диапазон напряжений литий-ионного аккумулятора составляет от 2,70 до 4,15 В). Соответствующим образом изменяются токи заряда и разряда, а следовательно, и потери в силовой кабельной сети и силовых преобразующих модулях ЭПА. Однако при расчетах используют некоторые фиксированные значения потерь в кабельной сети и фиксированные значения напряжения АБ на разряде и заряде, соответствующие худшему случаю.

Все это приводит к возникновению дополнительных относительно необходимых по методике формирования требований запасов: мощности БС, энергоемкости АБ, параметров кабельной сети и ЭПА, при расчете

энергетического баланса КА. В связи с этим актуальным является вопрос совершенствования методики формирования требований к СЭП путем учета нестационарности характеристик составных частей СЭП в процессе их орбитального функционирования.

Формирование требований к массогабаритным характеристикам СЭП осуществляется по данным массогабаритных характеристик прототипов. Для этого при формировании массива исходных данных определяют удельные по массе параметры известных прототипов (см. табл. 1.1), а далее вычисляют значения массы элементов СЭП, как показано, например, в [1, 22, 30, 32].

Результаты расчета энергетического баланса КА в виде требований к техническим характеристикам и массе составных частей СЭП дают возможность оценки энергомассовых характеристик СЭП и их оптимизации по определенному критерию. Критерий оптимизации энергомассовых характеристик СЭП рассмотрен далее.

1.3 Критерий оптимизации энергомассовых характеристик СЭП

Оптимизация характеристик СЭП может быть осуществлена по различным критериям. В диссертации [34] рассматривается оптимизация СЭП космического аппарата по критериям минимума массы, стоимости и взвешенной функции эффективности СЭП. Критериями оптимизации являются либо нахождение экстремума какой-либо целевой функции, либо нахождение множеств Парето [35]. Целевая функция при этом может быть выражена как аналитически, так и неявно, в виде набора ее значений при различных значениях параметров системы.

Под энергомассовой характеристикой СЭП космического аппарата понимается численное значение отношения ее выходной мощности к ее массе, которое может быть выражено уравнением (1.2):

$$P_{уд} = \frac{P_{СЭП}}{M_{СЭП}}, \quad (1.2)$$

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

Поскольку выходная мощность СЭП геостационарного КА (см. параграф 1.2) принимается постоянной, то параметр $P_{СЭП}$ является константой, которая определяется исходными данными решения задачи оптимизации. Типичный диапазон значений выходной мощности современных геостационарных КА составляет от 6 до 20 кВт [36].

Масса СЭП определяется как сумма масс составных частей СЭП. Для определения функционала массы СЭП необходимо рассмотреть состав СЭП современных геостационарных КА в части влияния на целевую функцию удельной мощности согласно выражению (1.2).

В состав оборудования современных СЭП геостационарных КА входят: солнечная батарея (БС), комплект литий-ионных аккумуляторных батарей (АБ), энергопреобразующая аппаратура (ЭПА), прибор контроля и защиты АБ (ПКЗ АБ). Функционально в состав СЭП входит силовая кабельная сеть, обеспечивающая передачу электроэнергии от БС и АБ к ЭПА. Обобщенная

структурно-функциональная схема СЭП, соответствующая исследуемой СЭП, представлена на рисунке 1.9.

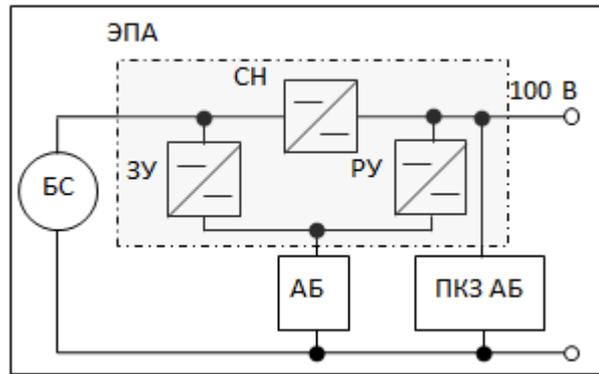


Рисунок 1.9 – Обобщенная структурно-функциональная схема СЭП

Следует отметить, что в состав современных СЭП геостационарных КА могут входить также блоки питания модуля служебных систем. Но, поскольку мощность потребления модуля служебных систем в рассматриваемом диапазоне изменения мощностей полезной нагрузки КА практически постоянна, то параметры этого прибора (выходная мощность и масса) не изменяются, а поэтому не оказывают влияния на результат оптимизации.

Масса СЭП определяется как сумма масс составных частей СЭП в соответствии с выражением (1.3), а функционал масс составных частей СЭП – в соответствии с выражениями (1.4 – 1.9):

$$M_{\text{СЭП}} = M_{\text{АБ}} + M_{\text{БС}} + M_{\text{ЭПА}} + M_{\text{ПКЗ АБ}} + M_{\text{БКС БС}} + M_{\text{БКС АБ}}; \quad (1.3)$$

$$M_{\text{АБ}} = f_1(C_{\text{АБ}}, N_{\text{АКК_ПОСЛ}}); \quad (1.4)$$

$$M_{\text{БС}} = f_2(N_{\text{ФП_ПОСЛ}}, N_{\text{ФП_ПАРАЛЛ}}); \quad (1.5)$$

$$M_{\text{ЭПА}} = f_3(P_{\text{ВЫХ}}, I_{\text{АБР_max}}, I_{\text{АБЗ_max}}, I_{\text{БС_max}}); \quad (1.6)$$

$$M_{\text{ПКЗ АБ}} = f_4(N_{\text{АКК_ПОСЛ}}); \quad (1.7)$$

$$M_{\text{БКС БС}} = f_5(I_{\text{БС_max}}); \quad (1.8)$$

$$M_{\text{БКС АБ}} = f_6(I_{\text{АБР_max}}), \quad (1.9)$$

где $M_{\text{АБ}}$, $M_{\text{БС}}$, $M_{\text{ЭПА}}$, $M_{\text{ПКЗ АБ}}$, $M_{\text{БКС БС}}$, $M_{\text{БКС АБ}}$ – массы АБ, БС, ЭПА, ПКЗ АБ, БКС БС, БКС АБ соответственно, кг; $C_{\text{АБ}}$ – ёмкость аккумуляторов в АБ, А×ч; $N_{\text{АКК_ПОСЛ}}$ – количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, шт.;

$N_{\text{ФП_ПОСЛ}}$, $N_{\text{ФП_ПАРАЛЛ}}$ – количество последовательно и параллельно соединенных ФП в БС, шт; $I_{\text{АБр_max}}$ – максимальный ток разряда АБ, А; $I_{\text{АБз_max}}$ – максимальный ток заряда АБ, А; $I_{\text{БС_max}}$ – максимальный ток БС, А, f_1-f_6 – функции зависимости массы составных частей СЭП от их параметров.

Таким образом, критерием оптимизации энергомассовых характеристик является нахождение глобального максимума функции (1.2) в заданных диапазонах изменения параметров СЭП и при соблюдении условия положительного энергетического баланса КА.

1.4 Подходы к созданию имитационных моделей СЭП

Одни из первых попыток разработки и применения имитационных моделей СЭП были предприняты в 1969 году инженерами американской корпорации TRW Systems (Paul Bauer), также известны работы специалистов британской оборонной и аэрокосмической компании British Aerospace PLC (W.R. Duncumb A.N. Casperd) [37, 38]. В данных работах имитационная модель СЭП создана с использованием языков программирования высокого уровня, с помощью которого реализован расчет энергетических характеристик составных частей СЭП, распределение энергетических потоков в СЭП и расчет энергетического баланса КА. Подобные модели создаются и используются также и в настоящее время не только для разработки непосредственно требований к СЭП, но и для отработки программного обеспечения СЭП и КА в целом [39].

Недостатками такого подхода являются жесткое соответствие модели тому объекту (СЭП), на соответствие которой она разрабатывалась, необходимость разработки пользовательского интерфейса и программной реализации алгоритмов расчета модели, а также программной реализации численных методов решения систем алгебраических и дифференциальных уравнений. Все это приводит к ограничениям в области применения разработанной модели, необходимости использования компетенций программиста и значительным трудозатратам в случае необходимости доработки модели.

Вместе с тем в настоящее время все более широко применяются прикладные математические программные пакеты, предназначенные, в том числе, для создания имитационных моделей электротехнических систем. Среди таких программных пакетов можно выделить пакеты Virtual Test Bed, Simulink Matlab, SimIntech и многие другие.

Результаты разработки имитационных моделей СЭП КА приведены в многочисленных как отечественных, так и зарубежных научных публикациях [40-51]. В частности, в работах [40, 41, 42, 51] приводятся результаты разработки имитационных моделей СЭП КА с помощью программных пакетов Virtual Test

Bed и Simulink Matlab. В данных работах представлены преимущества сочетания методов структурного и имитационного моделирования СЭП, возможность применения которых обеспечивает разработанное программное обеспечение. В частности, отмечено, что модель реализует алгоритм экстремального регулирования мощности БС, а также обеспечивается гибкость и трансформируемость модели и повышенная скорость вычислений за счет допустимого упрощения модели.

Вместе с тем указанные выше модели обладают рядом недостатков, а именно:

- в случае, если имитационные модели силовых преобразователей ЭПА реализуются в виде функциональных схем замещения реальных преобразователей [40, 41, 42], то отсутствует возможность задания требуемых параметров энергетической эффективности преобразователя;
- в случае если имитационные модели силовых преобразователей ЭПА реализуются в виде передаточных функций КПД, не обосновано применение постоянного значения параметра КПД силовых преобразователей ЭПА во всем диапазоне напряжений и токов АБ и БС, в то время как этот параметр является нелинейной функцией выходной мощности силового преобразователя. Кроме того, при различных значениях входных напряжений и токов ЭПА со стороны БС и АБ получается семейство кривых КПД как функции выходной мощности силового преобразователя ЭПА;
- не учтены значения КПД разрядного и зарядного устройств ЭПА;
- отсутствует или затруднена необходимостью получения и верификации новых входных данных возможность масштабирования модели с целью расчета энергетического баланса КА для различных вариантов состава оборудования СЭП (различная емкость и количество последовательно и параллельно соединенных аккумуляторов в АБ; различное количество последовательно соединенных ФП в БС);

- применены параметрические имитационные модели АБ, которые используют в качестве входных данных характеристики, которые не гарантируются производителем АБ и недоступны для использования при отсутствии экспериментальных данных, что не позволяет адекватно воспроизводить функционирование АБ различной емкости и количества последовательно и параллельно соединенных аккумуляторов;
- заряд АБ осуществляется постоянным током, а не в квазипотенциостатическом режиме (с некоторыми фиксированными значениями тока заряда), как это происходит в реальных системах;
- не учтены потери энергии в бортовой кабельной сети СЭП;
- в модели БС не всегда реализуется взаимосвязь между условиями освещенности, электрическим режимом работы БС и тепловым режимом работы БС;
- отсутствует расчет потерь энергии в элементах СЭП, который необходим для осуществления расчета энергетического баланса КА и задания требований к элементам СЭП.

Таким образом, разработка имитационной модели СЭП геостационарного КА как ключевого средства проведения расчета энергетического баланса КА, удовлетворяющего указанным выше условиям, является актуальной научно-технической задачей.

Исходя из задач применения имитационной модели СЭП геостационарного КА, которые заключаются в проектировании СЭП с оптимальными энергомассовыми характеристиками, разрабатываемая имитационная модель СЭП геостационарного КА должна удовлетворять следующим требованиям:

1. Соответствовать структурной схеме ЭПА, примененной в исследуемой СЭП.

2. Адекватно, т.е. с достаточной для инженерных расчетов точностью, воспроизводить происходящие в статических режимах работы реальной СЭП геостационарного КА электрические и энергетические процессы.
3. Учитывать обоснованные параметры энергетической эффективности всех силовых энергопреобразующих устройств из состава СЭП.
4. Использовать в качестве входных данных гарантируемые и предоставляемые разработчиком характеристики оборудования СЭП.
5. Обладать свойством 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 СЭП, а также потери энергии в ЭПА СЭП во всех режимах работы СЭП.
7. Учитывать взаимовлияние электрических и тепловых режимов БС при воспроизведении электрических характеристик БС.
8. Обеспечивать возможность исполнения имитационной модели на ПК в офисной конфигурации за приемлемое время.

1.5 Выводы

Проведенный обзор структурных схем систем электропитания для геостационарных КА позволил сделать заключение о преимуществе модульной структуры СЭП и возможности задания требований к рабочему диапазону напряжений БС и АБ независимо от номинальных значений выходного напряжения ЭПА. Отмечается, что известные методики формирования требований к СЭП не учитывают нестационарность характеристик БС и АБ при расчете энергетического баланса КА.

Сформулированный критерий оптимизации энергомассовых характеристик СЭП предполагает нахождение максимума удельной мощности СЭП в заданном диапазоне изменения ее характеристик и при соблюдении условия положительного энергетического баланса КА.

Приведенные в данной главе требования к разработке имитационной модели СЭП позволяют в полной мере использовать ее как инструмент расчета энергетического баланса КА и оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания.

Таким образом, сформулированную задачу улучшения удельных энергомассовых характеристик систем электропитания можно ставить не только для проектируемых КА, но и для анализа функционирования СЭП эксплуатируемых аппаратов.

Глава 2. Имитационное моделирование СЭП с учетом нестационарности характеристик БС и АБ

Целью создания и последующего применения имитационной модели СЭП геостационарного КА является расчет и подтверждение достаточности требуемых энергетических характеристик составных частей СЭП (АБ, БС, БКС, ЭПА), а также параметров их силового электрического интерфейса.

Как показано ранее (глава 1, параграф 1.2), для определения требований к составным частям СЭП необходимо осуществить расчет энергобаланса КА. В ходе расчета энергобаланса КА используются энергетические и мощностные параметры составных частей СЭП, такие как: ёмкость комплекта АБ, мощность БС, ток и напряжение БС, ток и напряжение АБ, параметры энергетической эффективности ЭПА и т.д. Мгновенные значения энергетических характеристик БС и АБ, в зависимости от режима их функционирования, определяются значениями их электрических характеристик (ВАХ БС, разрядно-зарядная характеристика АБ), которые являются нелинейными.

Требуемые параметры силового электрического интерфейса между составными частями СЭП определяются по предельным значениям установившихся токов и напряжений без учета нестационарности их характеристик.

Поэтому характеристиками (свойствами) имитационной модели составных частей СЭП и СЭП в целом, которые должны соответствовать свойствам реальных объектов, являются значения токов и напряжений АБ и БС в процессе функционирования системы, а также значения параметров энергетической эффективности ЭПА.

Таким образом, адекватность имитационной модели СЭП и ее составных частей следует подтверждать путем сравнения получаемых по модели значений токов, напряжений и параметров энергетической эффективности объекта моделирования и этих же значений, полученных экспериментально.

Поскольку имитационная модель СЭП используется для решения оптимизационной задачи, в ходе выполнения которой осуществляется изменение количественного состава (количество и ёмкость аккумуляторов, количество ФП в последовательной и параллельной цепях БС, количество силовых модулей ЭПА и т.д.) составных частей СЭП, необходимо, чтобы имитационная модель СЭП обладала свойством масштабируемости, т.е. требуется, чтобы сохранялась адекватность модели при изменении количественных параметров составных частей объекта моделирования.

Для создания имитационной модели СЭП геостационарного КА необходимо разработать имитационные модели БС, АБ, ЭПА и БКС. Создание имитационной модели БКС отдельно не рассматривается, поскольку данная модель представляет собой схему замещения в виде последовательно-параллельного соединения омических сопротивлений проводов, а её функционирование с достаточной для решаемой задачи точностью описывается законами Ома и Кирхгофа.

В соответствии с критериями подтверждения адекватности имитационной модели СЭП можно выделить следующие функции ЭПА.

1. Преобразование и передача электрической энергии БС и АБ в нагрузку, а также осуществление заряда АБ с заданными параметрами энергетической эффективности ЭПА.
2. Обеспечение согласованного функционирования БС и АБ в составе СЭП путем реализации преимущественного использования мощности БС за счет зонного принципа регулирования выходного напряжения ЭПА.
3. Обеспечение экстремального регулирования мощности БС.
4. Обеспечение заряда АБ падающим током (в квазипотенциостатическом режиме).

Параметры энергетической эффективности ЭПА инвариантны функциям преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС, а также функции заряда АБ падающим током, что дает возможность выделить из состава перечисленных функций ЭПА функцию преобразования и передачи

электрической энергии с заданной энергетической эффективностью. Энергетическая эффективность ЭПА отражает свойства силовых преобразователей (схемотехнические решения, номиналы примененных электрорадиоизделий (ЭРИ), конструкция и т.д.), а преимущественное использование и экстремальное регулирование мощности БС и заряд АБ падающим током – свойства реализованных в схеме управления алгоритмов. Поэтому функция преобразования и передачи электрической энергии ЭПА может быть реализована в виде энергетической имитационной модели ЭПА, устанавливающей зависимость между значениями входных и выходных мощностей силовых преобразователей ЭПА.

Три другие функции реализуются на уровне имитационной модели СЭП в целом путем формирования и реализации в модели требуемых алгоритмов изменения соотношений входных и выходных мощностей силовых преобразователей ЭПА, а также шагового алгоритма поиска максимальной мощности БС путем изменения напряжения рабочей точки БС. При этом параметры энергетической эффективности силовых преобразователей ЭПА сохраняют свое действие.

Для разработки имитационной модели СЭП необходимо провести интеграцию разработанных ранее моделей БС, АБ и энергетической имитационной модели ЭПА и дополнить их функциями (алгоритмами) преимущественного использования мощности БС и экстремального регулирования мощности БС. Подтверждение адекватности имитационной модели СЭП в целом в этом случае осуществляется путем демонстрации преимущественного использования, а также экстремального регулирования мощности БС и заряда АБ падающим током в процессе функционирования модели.

Учитывая изложенное, разработка и подтверждение адекватности имитационной модели СЭП геостационарного КА должна проводиться в следующем порядке.

1. Разработка и подтверждение адекватности имитационной модели БС.
2. Разработка и подтверждение адекватности имитационной модели АБ.
3. Разработка и подтверждение адекватности энергетической имитационной модели ЭПА.
4. Разработка и подтверждение адекватности имитационной модели СЭП в целом.

В ходе подтверждения адекватности моделей использованы данные, полученные в ходе проведения экспериментов по определению параметров составных частей СЭП. Подробно экспериментальная часть описана в главе 4.

Имитационные модели БС и АБ разрабатываются для статических режимов работы с учетом нестационарности их характеристик.

При разработке имитационных моделей составных частей СЭП приняты следующие допущения.

1. Параметры деградации всех фотопреобразователей в БС идентичны друг другу.
2. Параметры деградации всех аккумуляторов в АБ идентичны друг другу.
3. Технологический разброс между параметрами вольт-амперной характеристики фотопреобразователей не учитывается ввиду его малой величины.
4. Технологический разброс между значениями внутреннего сопротивления и энергоёмкости аккумуляторов не учитывается ввиду его малой величины.
5. Зависимость характеристик АБ от температуры не учитывается ввиду того, что в составе КА АБ функционирует условиях термостатирования ее посадочной поверхности в достаточно узком диапазоне (от 10 до 40 °С).
6. Характер изменения коэффициента освещенности БС при входе и выходе из тени Земли принимается линейным.

2.1 Имитационная модель БС

Солнечная батарея современных КА на ГСО состоит, как правило, из идентичных панелей в количестве от двух до десяти, с установленной на каждой из них фотогенерирующей частью. Типичный состав одной панели БС включает в себя следующие основные элементы:

- 1) ФГЧ БС, включающая: модули БС, изготовленные на основе трехкаскадных GaAs ФП;
- 2) развязывающие устройства (РУ);
- 3) шунтирующие устройства (ШУ);
- 4) два температурных датчика (по одному температурному датчику на каждой корневой панели в крыле);
- 5) внутренняя кабельная сеть;
- 6) переходные элементы (кронштейны крепления соединителей и элементы крепления к каркасам развязывающих устройств, модулей и кабельной сети);
- 7) выходные электрические соединители панелей.

Существуют различные конструкции каркасов, на которые крепятся БС. В КА зарубежного производства, как правило, применяются каркасы в виде сотовых панелей, в то время как в РФ наиболее распространены углепластиковые трубчатые каркасы с натянутыми на них нитями (струнами), к которым крепится фотогенерирующая часть БС. Далее рассматривается струнный тип каркасов, как обладающий лучшими показателями удельной массы и обеспечивающий лучшие условия теплоотвода от ФП [53, 54, 36].

Задача создания имитационной модели БС сводится к задаче создания имитационной модели одного ФП, по характеристикам которого рассчитываются характеристики всей БС путем учета количества последовательно и параллельно соединенных ФП в БС.

Согласно [52], эквивалентная схема как для кремниевых, так и для арсенид-галлиевых ФП может быть с достаточной достоверностью представлена

генератором фототока, параллельно которому подключен диод, а в общей цепи – последовательное сопротивление. Уравнение ВАХ ФП в этом случае имеет вид

$$I = I_{sc} - I_s \cdot (e^{\beta \cdot (V - r \cdot I)} - 1), \quad (2.1)$$

где I_{sc} – фототок ФП, А; I_s – обратный ток насыщения, А; $\beta = \frac{1}{V_t}$ – обратная величина теплового потенциала, В⁻¹; r – последовательное сопротивление ФП, Ом; I – ток нагрузки ФП, А; V – напряжение нагрузки ФП, В.

Фототок I_{sc} ФП можно приравнять к току КЗ ФП I_0 , ввиду его малого по величине отличия.

Значения величин I_s , r , β в (2.1) можно определить следующим образом. При известных значениях тока короткого замыкания I_0 , напряжения холостого хода V_{oc} , тока и напряжения максимальной мощности I_{opt} , V_{opt} (полученных, например, прямыми измерениями) выполняются следующие соотношения:

$$r = \frac{V_{opt}}{I_{opt}} - \frac{1}{\beta \cdot (I_0 - I_{opt})}; \quad (2.2)$$

$$\beta = \frac{\frac{I_{opt}}{I_0 - I_{opt}} + \ln(1 - \frac{I_{opt}}{I_0})}{2 \cdot V_{opt} - V_{oc}}; \quad (2.3)$$

$$I_s = \frac{I_0}{e^{\beta \cdot V_{oc}} - 1}. \quad (2.4)$$

Значением обратного тока шунтирующего диода можно пренебречь ввиду его малости.

Для расчета ВАХ ФП с учетом его температуры, радиационной деградации, а также количества последовательно и параллельно соединенных ФП, исходный массив характеристик ФП преобразуется в соответствии с выражениями:

$$I_{opt} = (I_{opt0} + Kt_{I_{opt}} \cdot F_0 \cdot (T - T_0)) \cdot N_p \cdot Ki_{opt}; \quad (2.5)$$

$$I_{sc} = (I_{sc0} + Kt_{I_{sc}} \cdot F_0 \cdot (T - T_0)) \cdot N_p \cdot Ki_{sc}; \quad (2.6)$$

$$V_{opt} = (V_{opt0} + Kt_{V_{opt}} \cdot (T - T_0)) \cdot N_s \cdot Kv_{opt}; \quad (2.7)$$

$$V_{oc} = (V_{oc0} + Kt_{V_{oc}} \cdot (T - T_0)) \cdot N_s \cdot Kv_{oc}, \quad (2.8)$$

где 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 ФП; $Kt_{I_{opt}}$ – 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 напряжению ФП в точке максимальной мощности; $Kt_{V_{oc}}$ – температурный коэффициент по напряжению холостого хода ФП; I_{opt0} – ток ФП в точке максимальной мощности, измеренный при температуре T_0 ; I_{sc0} – ток короткого замыкания ФП, измеренный при температуре T_0 ; V_{opt0} – напряжение ФП в точке максимальной мощности, измеренное при температуре T_0 ; V_{oc0} – напряжение холостого хода ФП, измеренное при температуре T_0 ; I_{opt} – результирующий ток ФП в точке максимальной мощности с учетом температуры, радиационной деградации и количества параллельно соединенных ФП; I_{sc} – результирующий ток короткого замыкания ФП с учетом температуры, радиационной деградации и количества параллельно соединенных ФП; V_{opt} – результирующее напряжение ФП в точке максимальной мощности с учетом температуры, радиационной деградации и количества последовательно соединенных ФП; V_{oc} – результирующее напряжение холостого хода ФП с учетом температуры, радиационной деградации и количества последовательно соединенных ФП.

Дополнительно к уравнениям (2.5-2.8) при разработке имитационной модели БС необходимо учесть влияние на нее факторов космического пространства. Основным фактором космического пространства, приводящим к деградации характеристик БС, является воздействие космической радиации.

Кроме этого, к деградации и (или) снижению характеристик БС приводит воздействие таких факторов, как воздействие микрометеоритов, снижение коэффициента пропускания защитных лицевых стекол ФП, изменение плотности солнечного излучения (в результате изменения условий ориентации нормали к фотоактивной поверхности ФП на Солнце или в результате сезонных изменений), воздействие электризации, рассогласование между последовательно соединенными ФП по току короткого замыкания и току в точке максимальной мощности и т.д. Поэтому численные значения коэффициентов Ki_{opt} , Ki_{sc} , Kv_{opt} , Kv_{oc} в уравнениях (2.5-2.8) следует определять с учетом перечисленных факторов деградации характеристик БС.

Для расчета температуры (T) ФП используется уравнение теплового баланса ФП. Для составления уравнения теплового баланса необходимо рассмотреть схему теплообмена ФП в космосе при работе ФП в составе БС на орбите. Схема теплообмена ФП в космосе представлена на рисунке 2.1.

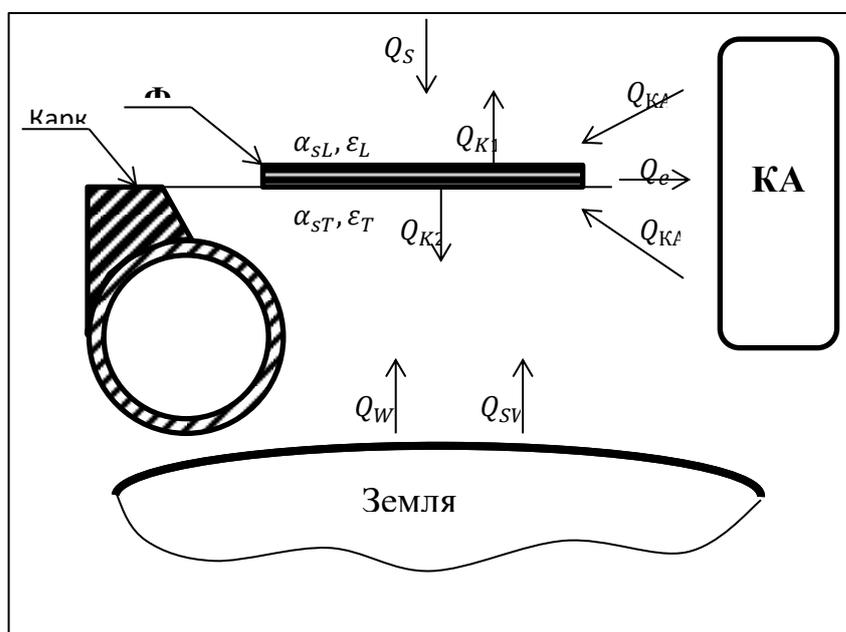


Рисунок 2.1 – Схема теплообмена ФП в космосе

На рисунке 2.1 Q_s – плотность теплового потока солнечного излучения, поглощенного лицевой поверхностью ФП, Вт/м²; Q_{K1} , Q_{K2} – плотность теплового потока, излучаемого в космическое пространство от ФП, Вт/м²; Q_{KA1} , Q_{KA2} – плотность теплового потока от КА на ФП, Вт/м²; Q_W – плотность теплового потока инфракрасного излучения от Земли, поглощенная поверхностью ФП,

Вт/м²; Q_{SW} – плотность теплового потока отраженного от Земли солнечного света, поглощенная поверхностью ФП, Вт/м²; Q_e – удельная электрическая энергия, преобразованная из солнечной в электрическую и отводимая с ФП, которая зависит от КПД и режима работы ФП, Вт/м²;

Плотностью теплового потока от ФП на каркасы панели БС, а также плотностью теплового потока, выделяемого на развязывающем устройстве можно пренебречь ввиду их малой величины и локального действия.

Уравнение теплового баланса в этом случае будет иметь следующий вид:

$$Q_S - Q_e - Q_{K1} - Q_{K2} + Q_{KA1} + Q_{KA2} + Q_W + Q_{SW} = \overline{cm}_f \cdot \frac{dT}{dt} \quad (2.9)$$

В уравнении (2.9) сумма слагаемых: Q_W , Q_{SW} , Q_{KA1} , Q_{KA2} – в процессе эксплуатации БС на геостационарной орбите имеет численное значение менее 10 Вт/м², что по отношению к плотности солнечного излучения Q_S (1367 Вт/м²) составляет менее 1 %. Поэтому для упрощения расчетов их можно объединить, обозначив их сумму Q_{add} как плотность теплового потока от КА и Земли, поглощенная лицевой и тыльной сторонами ФП (2.10):

$$Q_{add} = +Q_{KA1} + Q_{KA2} + Q_W + Q_{SW} \quad (2.10)$$

Численное значение данного параметра можно подобрать в процессе проверки адекватности модели по летным данным.

Тогда, согласно закону Стефана – Больцмана для «серых» тел, уравнение теплового баланса для ФП в космосе будет иметь вид (2.11)

$$Q_S - \frac{I \cdot V}{F_0} - (\varepsilon_L - \varepsilon_T) \cdot \sigma \cdot T^4 + (\alpha_{sL} - \alpha_{sT}) \cdot Q_{add} = \overline{cm}_f \cdot \frac{dT}{dt}, \quad (2.11)$$

где 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).

Поскольку каждый элементарный генератор развязан от остальных элементарных генераторов блокирующим устройством (диодной сборкой), то следует учитывать падение напряжения на этих диодах. Также следует учесть падение напряжения на омическом сопротивлении проводов, соединяющих фотопреобразователи каждого элементарного генератора. Падение напряжения на блокирующих диодах, а также на соединительных проводах каждого элементарного генератора оценивается выражениями (2.12-2.13):

$$V_{dc}(I) = V_{tdc} \cdot \ln\left(\frac{I}{I_{sdc}} + 1\right) + r_{dc} \cdot I; \quad (2.12)$$

$$V_{OM_ЭГ}(I_{ЭГ}) = R_{ЭГ} \cdot I_{ЭГ}, \quad (2.13)$$

где $V_{dc}(I)$ – падение напряжения на блокирующем устройстве, В; V_{tdc} – тепловой потенциал, В; I – ток блокирующего устройства, А; I_{sdc} – ток насыщения диода, А; r_{dc} – внутреннее электрическое сопротивление диода, Ом; $V_{OM_ЭГ}(I_{ЭГ})$ – падение напряжения на соединительных проводах элементарного генератора, Ом; $R_{ЭГ}$ – сопротивление соединительных проводов элементарного генератора, Ом; $I_{ЭГ}$ – ток элементарного генератора, А.

Таким образом, с помощью уравнений (2.1 – 2.13) можно описать взаимосвязь электрических и теплофизических характеристик ФП, а также получить их текущие (мгновенные) значения в зависимости от текущего значения электрической нагрузки и значения плотности солнечного излучения. Следует отметить, что модель не описывает динамические характеристики БС, связанные с наличием собственной электрической емкости и индуктивности БС, что, вообще говоря, и не требуется при имитационном моделировании параметров БС с целью оценки её энергетических характеристик.

Модель создана в программном пакете MATLAB Simulink с использованием инструмента Simscape. Данная имитационная модель также была реализована в работе [55].

Внешний вид макетного образца для имитационной модели БС, реализованной в пакете инженерных расчетов MATLAB Simulink 2017b, показан на рисунке 2.2.

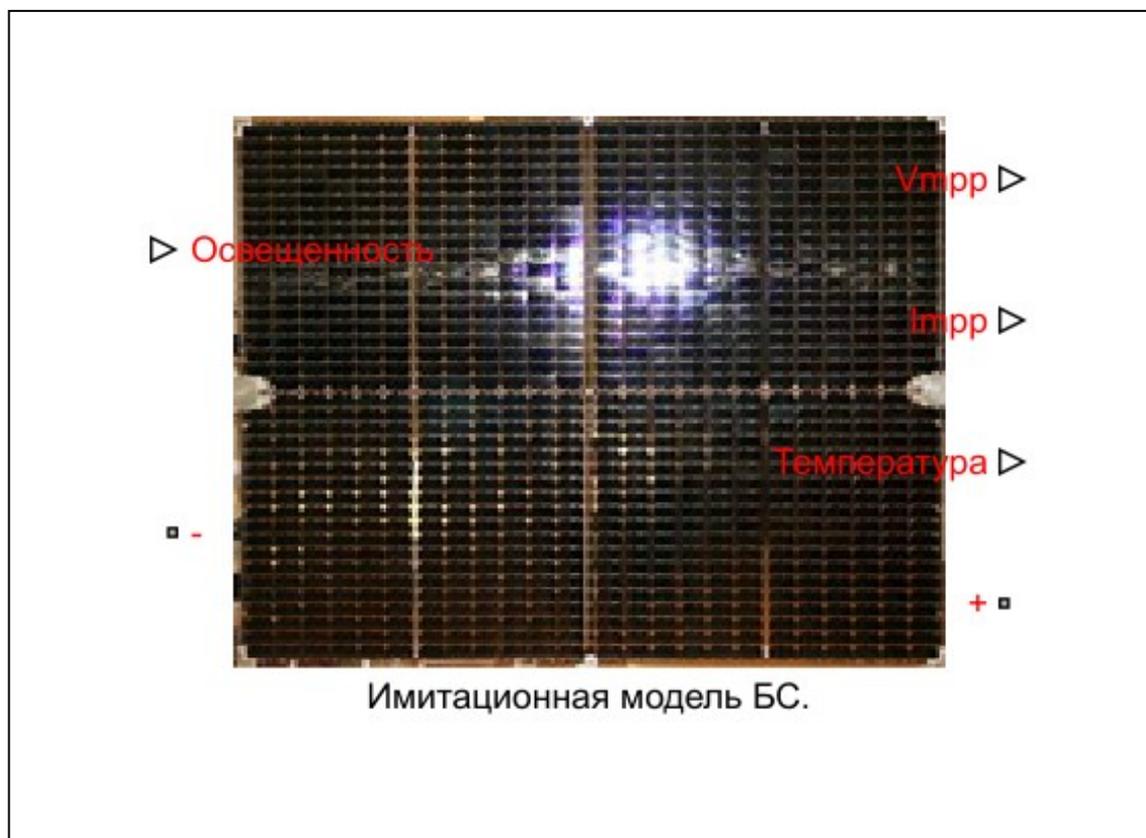


Рисунок 2.2 – Внешний вид макетного образца для имитационной модели БС

Имитационная модель БС имеет один сигнальный вход, на который подается сигнал значения коэффициента освещенности, три сигнальных выхода по которым передаются значения напряжения и тока БС в точке максимальной мощности, а также текущие значения рабочей температуры БС, а также порты для подключения к электрической модели (обозначены на рис. 2.2 «+» и «-»).

2.2 Имитационная модель ЛИАБ

Задачей создания имитационной модели литий-ионной аккумуляторной батареи является воспроизведение её нелинейных зарядно-разрядных характеристик, т.е. воспроизведение численных значений напряжения АБ под воздействием зарядного и разрядного токов. При этом требуется, чтобы параметры модели, идентифицированные по измерительным данным одного или нескольких реальных образцов ЛИАБ и ЛИА, было возможно использовать для имитационной модели ЛИАБ и ЛИА произвольной емкости, задавая её в качестве входного параметра модели.

Существует несколько используемых на практике моделей ЛИАБ. Для случая, когда от имитационной модели ЛИАБ не требуется адекватного воспроизведения ее нелинейной зарядно-разрядной характеристики, может быть использована простейшая модель выходного напряжения $V_{\text{ЛИАБ}}(I)$ ЛИАБ [56, 57]:

$$V_{\text{ЛИАБ}}(I) = E_0 - IR_0, \quad (2.14)$$

где E_0 – ЭДС ЛИАБ, В; I – зарядно-разрядный ток, А; R_0 – внутреннее сопротивление ЛИАБ, Ом.

Также известна более точная модель, использующая схему замещения Тевенена [58]. С её помощью удастся описать динамические процессы в литий-ионном аккумуляторе при изменении зарядно-разрядного тока, а зависимость напряжения ЛИА от зарядно-разрядного тока моделируется в виде идеального источника напряжения и RC цепи. Один из вариантов схемы замещения ЛИА имеет вид, представленный на рисунке 2.3.

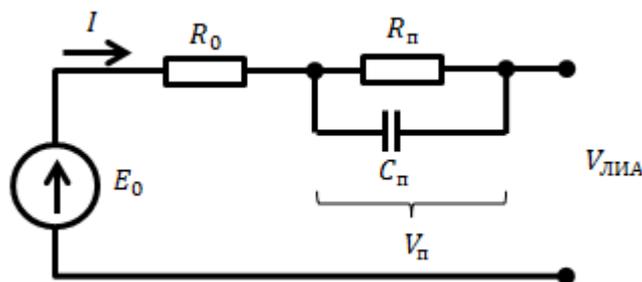


Рисунок 2.3 – Эквивалентная схема ЛИА по модели Тевенена

Система уравнений, описывающая работу модели по приведенной схеме замещения, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dV_{\Pi}}{dt} = \frac{I}{C_{\Pi}} - \frac{V_{\Pi}}{R_0 \cdot C_{\Pi}}, \\ V_{\text{ЛИА}} = E_0 - IR_0 - V_{\Pi} \end{cases}, \quad (2.15)$$

где $V_{\text{ЛИА}}$ – напряжение ЛИА, В; V_{Π} – поляризационное сопротивление, В; R_0 – внутреннее сопротивление ЛИА, Ом; E_0 – ЭДС ЛИА, В; C_{Π} – эквивалентная поляризационная емкость ЛИА, Ф; I – зарядно-разрядный ток ЛИА, А.

Далее, в систему уравнений (2.15) вводятся уравнения зависимости параметров модели от степени заряженности ЛИА, и получившуюся систему уравнений используют для моделирования зарядно-разрядных характеристик ЛИА, а также для оценки остаточной емкости ЛИА [59].

Применение данной модели позволяет описать зарядно-разрядную характеристику ЛИА, в том числе и с учетом её нелинейности, однако для этого требуется определить зависимость параметров модели от уровня заряженности ЛИА. Поскольку при разработке и изготовлении ЛИАБ для применения в составе СЭП КА зависимость поляризационной емкости, поляризационного сопротивления, внутреннего сопротивления и ЭДС ЛИАБ от степени заряженности ЛИА не нормируется, то и задача определения этих зависимостей не ставится. Поэтому данные зависимости оказываются недоступными для их применения в составе модели ЛИАБ и разработчиком ЛИАБ не гарантируются. Данные зависимости могут быть оценены путем проведения большого объема испытаний, в том числе путем разряда АБ малым током (или измерения напряжения разомкнутой цепи АБ в процессе саморазряда), что занимает значительное время и поэтому обычно в процессе эксплуатации ЛИАБ не осуществляется.

Следует также отметить, что существуют и другие способы создания имитационных моделей АБ. Так, в литературе описано создание моделей АБ с использованием нейронных сетей, модели Тевенена с применением фильтра Калмана, модель ЛИА двойной поляризации, дополненная автокорреляционной

моделью с внешним входом, модель на основе нечетко-логических систем и т.д. [60, 61, 62, 63, 64].

Указанные выше способы создания имитационных моделей ЛИАБ обладают определенными недостатками, например, требуется находить зависимости параметров модели от степени заряженности ЛИАБ (что требует наличия соответствующих экспериментальных исходных данных, подтвержденных производителем ЛИАБ), либо требуют значительных вычислительных ресурсов для создания и эксплуатации модели (в случае применения фильтра Калмана или нейронной сети).

Поскольку имитационная модель ЛИАБ используется для решения оптимизационной задачи, которая требует проведения большого количества расчетных итераций модели, необходимо, чтобы имитационная модель ЛИАБ обладала следующими свойствами:

- адекватно воспроизводила численные значения зарядно-разрядной характеристики ЛИАБ с учетом её нелинейности;
- не требовала значительных вычислительных ресурсов;
- использовала в качестве входных данных параметры ЛИАБ, которые определены её разработчиком и изготовителем, а также минимальное количество идентифицированных по экспериментальным данным модельных параметров;
- обеспечивала возможность применения идентифицированных по экспериментальным данным прототипа ЛИАБ модельных параметров для имитационного моделирования ЛИАБ с произвольной емкостью и количеством последовательно соединенных аккумуляторов.

Учитывая это, целесообразно для имитационной модели ЛИАБ использовать параметрическую модель на основе уравнений Шеферда [65, 66]. В этом случае система уравнений, описывающая параметрическую модель ЛИА, будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} V_{AB} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \cdot (\exp(-B \cdot it) - 1) | i^* > 0 \\ V_{AB} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^* - K \frac{Q}{Q - it} \cdot it + (A \cdot \exp(-B \cdot it) - 1) | i^* \leq 0 \end{cases}, \quad (2.16)$$

где V_{AB} – напряжение АБ, В; E_0 – ЭДС АБ, В; i – ток заряда или разряда АБ, А; R – внутреннее сопротивление АБ, Ом; K – константа поляризации, В/А·ч; Q – максимальная ёмкость АБ, А·ч; it – отданная АБ ёмкость, А·ч; i^* – низкочастотная составляющая зарядно-разрядного тока АБ, А; A – эмпирический коэффициент модели, В; B – эмпирический коэффициент модели, А·ч⁻¹. Первое уравнение в системе (2.16) описывает процесс разряда, второе – процесс заряда.

В результате исследования возможности применения выражений (2.16) для аппроксимации имеющихся экспериментальных данных по разрядной и зарядной характеристикам реальных ЛИАБ космического применения установлено, что экспериментальные данные аппроксимируются неудовлетворительным образом. В частности, слагаемое $A \cdot \exp(-B \cdot it)$ первого уравнения дает смещение разрядной характеристики, равное A при it , равном нулю, т.е. для полностью заряженной АБ. Поскольку напряжение полностью заряженной АБ в режиме разомкнутой цепи известно, то данное смещение следует исключить, и тогда указанное слагаемое преобразуется к виду $A \cdot (\exp(-B \cdot it) - 1)$.

Кроме того, в [65] указано, что слагаемое $K \frac{Q}{it + 0.1Q} \cdot i^*$, описывающее изменение поляризационного сопротивления в системе уравнений (2.16) носит эмпирический характер и выведено на основе неких экспериментальных данных показывающих, что поляризационное сопротивление смещено на 10% емкости АБ. Вместе с тем в [66] уравнение для заряда АБ не содержит данного смещения. Величина данного смещения может варьироваться в зависимости от состава электрохимической группы аккумуляторов, а также от технологии их производства (толщины активного слоя электродов, примененных материалов и т.д.). Поэтому, принимая во внимание то, что максимальная емкость Q всегда больше извлеченной из нее емкости it (т.е. поляризационное сопротивление не обращается в бесконечность), а также исходя из приемлемой сходимости

результатов моделирования, смещением поляризационного сопротивления можно пренебречь.

Еще одной особенностью описания разрядно-зарядной характеристики ЛИАБ с помощью системы уравнений (2.16) является то, что динамика изменения напряжения ЛИАБ в процессе заряда и в процессе разряда определяется одними и теми же коэффициентами K, A, B . В этом случае динамика изменения разрядной и зарядных кривых напряжения ЛИАБ будет совпадать. Поэтому для учета отличий динамики изменения разрядной и зарядной кривых напряжения ЛИАБ, коэффициенты K, A, B для зарядной кривой следует подбирать отдельно и учитывать при переходе от разряда к режиму хранения и заряду.

Тогда, используя приведенные выше положения, систему уравнений (2.16) следует преобразовать к виду

$$\begin{cases} V_{AB} = E_0 - R \cdot i - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A \cdot (\exp(-B \cdot it) - 1) | i^* > 0 \\ V_{AB} = E_0 - R \cdot i - K1 \cdot K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot (it + i^*) + A1 \cdot A \cdot \exp(-B1 \cdot B \cdot it) - 1 | i^* \leq 0 \end{cases}, \quad (2.17)$$

где $K1, A1, B1$ – дополнительные параметры модели, определяющие зарядную характеристику ЛИАБ.

Для перехода к модели ЛИАБ с произвольной ёмкостью и количеством аккумуляторов в последовательной цепи следует найти параметры K, A, B, R . Параметры $K1, A1, B1$ при этом не изменятся, поскольку они представляют собой требуемую долю изменения параметров K, A, B .

Значения новых параметров для ЛИАБ произвольной ёмкости и количества последовательно соединенных аккумуляторов можно найти используя выражения (2.18-2.21):

$$K = K_0 \cdot \frac{Q_0^{max}}{Q^{max}}; \quad (2.18)$$

$$B = B_0 \cdot \frac{Q_0^{max}}{Q^{max}}; \quad (2.19)$$

$$A = A_0 \cdot \frac{V_{akk}^{max} \cdot N}{V_{akk_0}^{max} \cdot N_0}; \quad (2.20)$$

$$R = R_{2\text{ЛИА85}} \cdot 2 \cdot N + \left(\frac{R_{2 \times 22\text{ЛИ85}} \cdot 2}{N_0} - R_{2\text{ЛИА85}} \cdot 2 \right) \cdot N; \quad (2.21)$$

где K_0 , B_0 , A_0 – ранее идентифицированные по экспериментальным данным прототипа параметры модели ЛИАБ; Q_0^{max} – максимальная емкость прототипа ЛИАБ, А·ч; N_0 – количество последовательно соединенных пакетов аккумуляторов (для прототипа в пакете соединено параллельно два аккумулятора ЛИГП-85); $R_{2\text{ЛИА85}}$ – оцененное по экспериментальным данным значение сопротивления одного пакета аккумуляторов прототипа, Ом; $R_{2 \times 22\text{ЛИ85}}$ – оцененное по экспериментальным данным значение сопротивления прототипа (ЛИАБ $2 \times 22\text{ЛИ85}$), Ом; N – новое количество аккумуляторов в моделируемой ЛИАБ; Q^{max} – максимальная емкость аккумулятора новой моделируемой ЛИАБ, А·ч.

Таким образом, разработана имитационная модель ЛИАБ геостационарного КА, идентифицированы ее параметры, сформулированы уравнения перехода к модели ЛИАБ с произвольной емкостью и количеством аккумуляторов, подтверждена адекватность модели. Схема имитационной модели ЛИАБ представлен на рисунке 2.4.

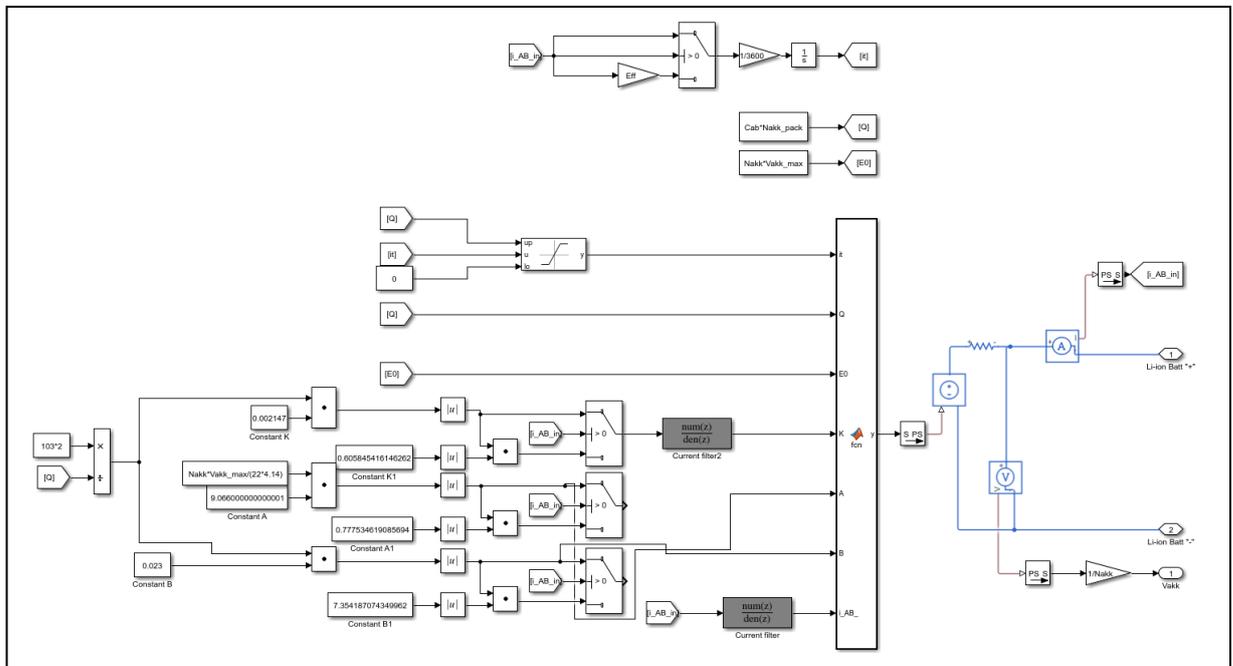


Рисунок 2.4 – Схема имитационной модели ЛИАБ

2.3 Имитационная модель энергетических процессов в ЭПА

Общепринятым энергетическим параметром ЭПА является «коэффициент полезного действия». Он обладает известными достоинствами:

- параметр универсальный и применяется для любых энергетических устройств.
- методика его определения по экспериментальным данным предельно проста.
- хорошо подходит для качественно-количественного сравнения однотипных устройств.

Однако для проведения системного количественного анализа (учёта энергетических параметров ЭПА в энергобалансе КА) требуется учесть нелинейность зависимости КПД от значений выходной мощности и входных напряжений преобразователей энергии. Т.е. так или иначе приходится находить и использовать некоторую модель, позволяющую осуществлять количественную оценку энергетической эффективности силового преобразователя во всем диапазоне выходных мощностей и входных напряжений.

Для применяемых в настоящее время типов силовых преобразователей ЭПА можно утверждать, что потери мощности в них состоят как минимум из двух качественно различных составляющих. Это следующие части суммы потерь энергии:

- потери, слабо зависящие от выходной мощности. Это схемы управления, автоматика, схемы приёма и формирования обменных сигналов и т.д.
- потери, непосредственно и сильно связанные с преобразованием энергии. Это потери, статические и динамические, в силовых ключевых элементах (транзисторы и диоды), которые переключают поток энергии, а также потери в реактивных элементах (дрессели/трансформаторы и ёмкостные фильтры), в которых энергия преобразуется.

Как предельный модельный случай, можно предположить, что первая составная часть может быть представлена константой, а вторая часть – константой линейной зависимости от выходной мощности ЭПА.

Вопрос о допустимости и применимости такой предельно простой энергетической линейной модели ЭПА будет определяться уровнем точности моделирования и его соответствия стандартному требованию точности инженерных расчётов (ошибка должна быть не более $\pm 3\%$).

Далее рассмотрим вывод и определение параметров энергетической эффективности ЭПА: «коэффициент передачи мощности» и «собственное потребление» на основе КПД.

Характерный вид графика зависимости КПД регулятора напряжения от входной мощности представлен на рисунке 2.5, где $P_{вх}$ – входная мощность при постоянном выходном напряжении 100 В. Оговоримся, что зависимость КПД принято строить от выходной мощности регулятора, однако для простоты дальнейших преобразований будем пользоваться зависимостью от входной мощности, тем более что в том и в другом случае, конечный результат получается идентичным.

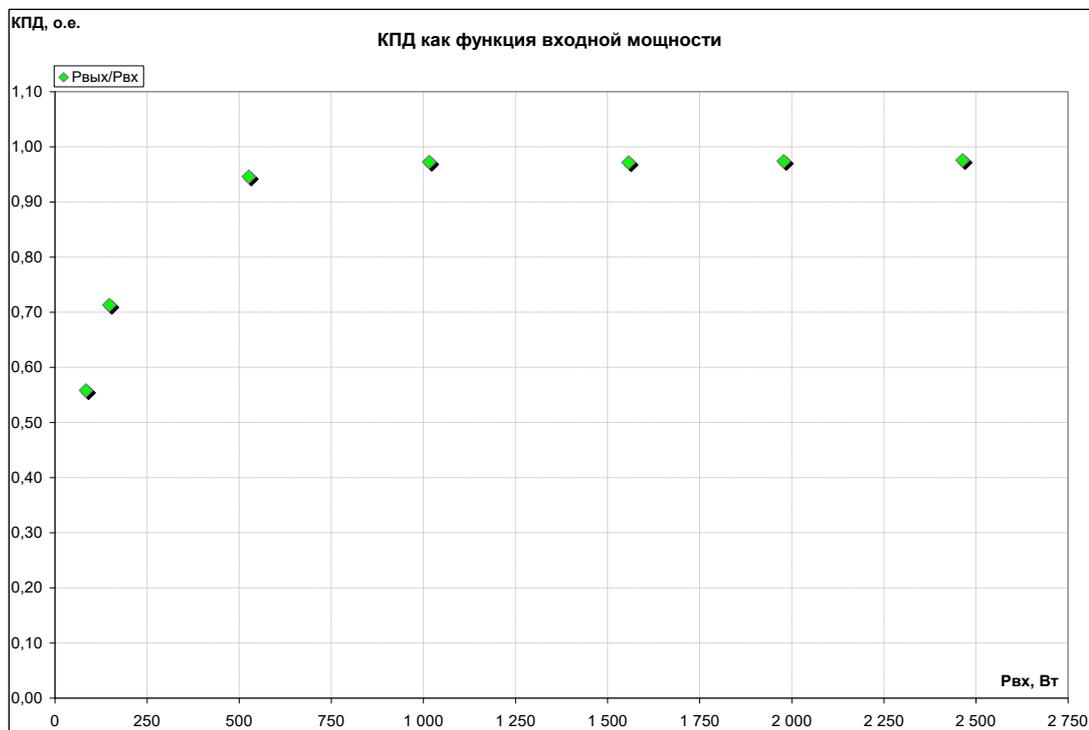


Рисунок 2.5 – КПД - как функция входной мощности

Параметр КПД является функцией от значения входной (выходной) мощности и изменяет своё значение в диапазоне от 0 до 1. Для обеспечения удобства практического применения, проведем вывод комплекса параметров

«коэффициент передачи мощности узлов ЭПА и собственное потребление (P_c) ЭПА» на основе параметра КПД. При этом значения параметров КПМ и P_c – константы и не зависят от значения выходной мощности. Для однозначного понимания рассматриваемых преобразований дадим следующие определения.

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 регулятора:

$$\text{КПМ} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{СОБ}}}. \quad (2.22)$$

При этом собственное потребление регулятора, $P_{\text{СОБ}}$, как и коэффициент передачи мощности, КПМ, являются константами.

Собственное потребление силового преобразователя – это сумма мощности собственного потребления регулятора, которая не зависит (слабо зависит) от значения мощности нагрузки (а также входной мощности и соотношения входных и выходных напряжений) и мощности потребления схемы управления и вспомогательных устройств, обеспечивающих работу регулятора (например, ВИПов):

$$P_{\text{СОБ}} = P_{\text{ВИП}} + P_{\text{per.const}} \quad (2.23)$$

КПД в классическом понимании представляется выражением

$$\frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = f(P_{\text{ВХ}}), \quad (2.24)$$

где $f(P_{\text{ВХ}})$ - нелинейная функция (см. рис. 2.5). Осуществим далее переход к данным выше определениям КПМ и собственного потребления ($P_{\text{СОБ}}$).

При анализе зависимостей параметров технических систем возможно использовать базовый набор аналитических функций, которые хорошо описывают (аппроксимируют) рассматриваемые зависимости параметров. Для графиков типа (2.24) (см. рис.2.5), может использоваться аналитическая функция вида (2.25).

$$f(P_{\text{ВЫХ}}) = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = a_0 - \frac{a_1}{P_{\text{ВХ}} + a_2} \quad (2.25)$$

Данное выражение получено эмпирически и хорошо описывает зависимость КПД от выходной мощности преобразователя.

Покажем, что выражение (2.25) может быть использовано для описания зависимости КПД от входной мощности. Для этого подберем стандартными средствами MS Excel коэффициенты уравнения (2.25) a_0 , a_1 , a_2 таким образом, чтобы ошибка между значениями КПД, которые получены по экспериментальным данным и по модели, была минимальной. Модельные значения КПД, которые получены с помощью уравнения (2.25), отобразим на графике, представленном на рисунке 2.6.

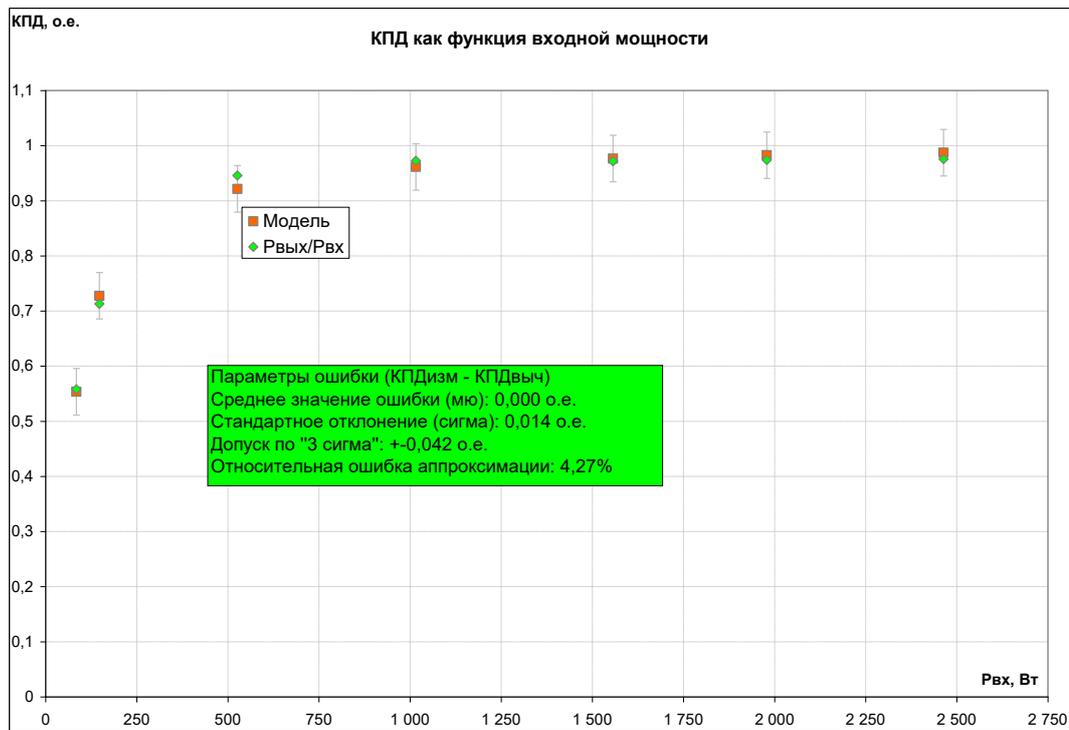


Рисунок 2.6 – Модельные значения КПД по формуле (2.25)

Статистический анализ полученной зависимости показывает, что выражение (2.25) с вероятностью 99,73% описывает зависимость КПД от входной мощности, при этом относительная ошибка аппроксимации составляет не более 4,27 % и, вероятнее всего, обусловлена погрешностью измерений. Относительная ошибка аппроксимации зависит от количества имеющихся измерений и уменьшается с их ростом. На рисунке 2.7 представлен график измеренных и

модельных значений КПД для бóльшего количества измерений. Как видно на рисунке 2.7, при увеличении количества измерений ошибка аппроксимации уменьшается кратно, что подтверждает адекватность использования предложенного аналитического выражения для аппроксимации зависимости КПД от мощности.

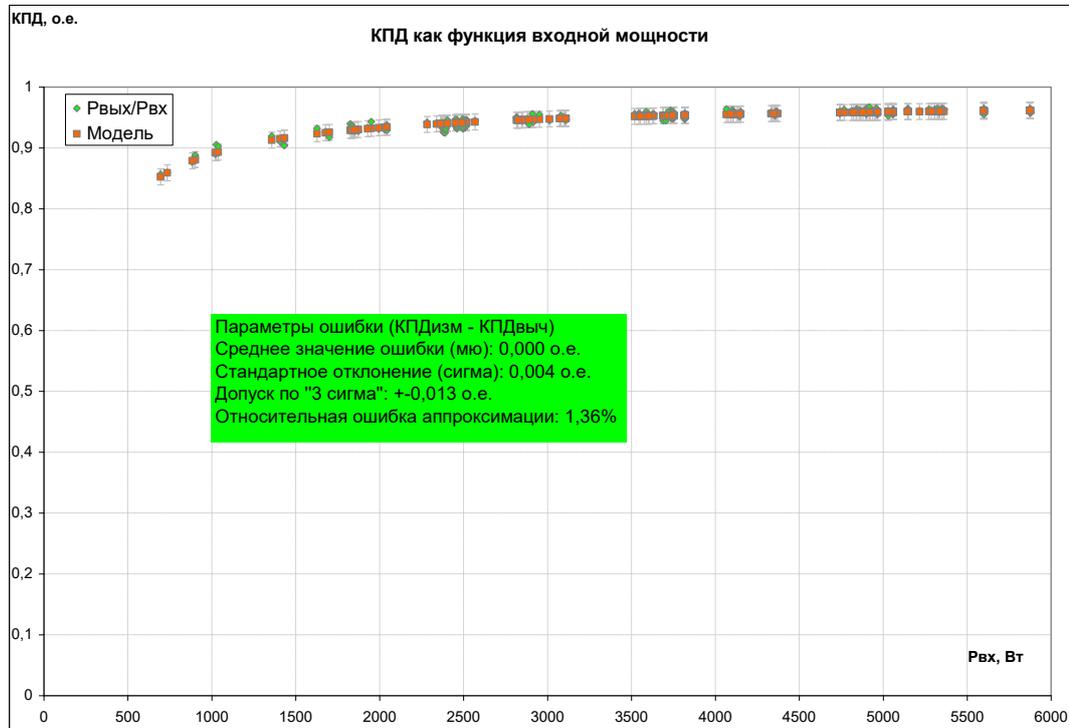


Рисунок 2.6 – Модельные значения КПД по формуле 2.25 при увеличении количества измерений

Далее выражение, определяющее зависимость КПД (уравнение (2.25)), может быть разрешено относительно входной мощности и упрощено следующим образом:

$$P_{\text{ВЫХ}}(P_{\text{ВХ}}) = a_0 \cdot P_{\text{ВХ}} - a_1 + \frac{a_1 \cdot a_2}{P_{\text{ВХ}} + a_2} \quad (2.26)$$

Данное выражение на интервале от 0 до $+\infty$ хорошо аппроксимируется функцией вида

$$y(x) = k \cdot x - b, \quad (2.27)$$

которая является его асимптотой. Нелинейность выражения (2.26) сильнее всего проявляется при близких к нулю значениях выходной мощности и не вносит существенных искажений в рассматриваемом диапазоне измеряемых значений мощности. Графики выражения (2.26) и выражения (2.26) с исключенным третьим

слагаемым, а также график третьего слагаемого представлены на рисунках 2.7, 2.8, 2.9.

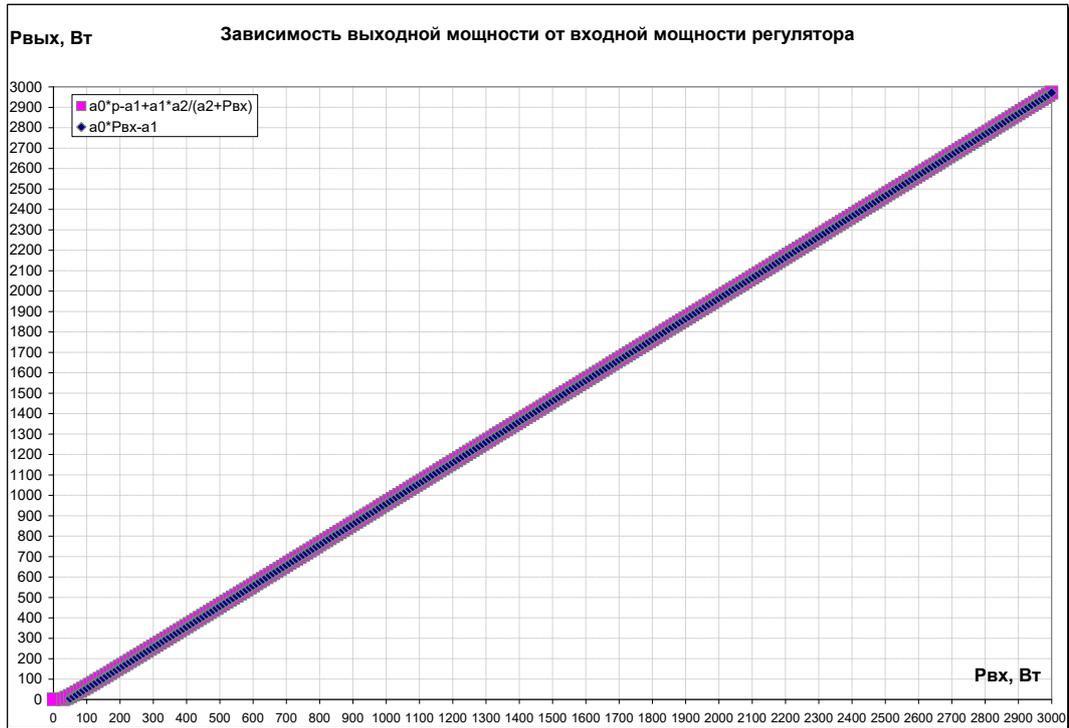


Рисунок 2.7 – График уравнения 2.26

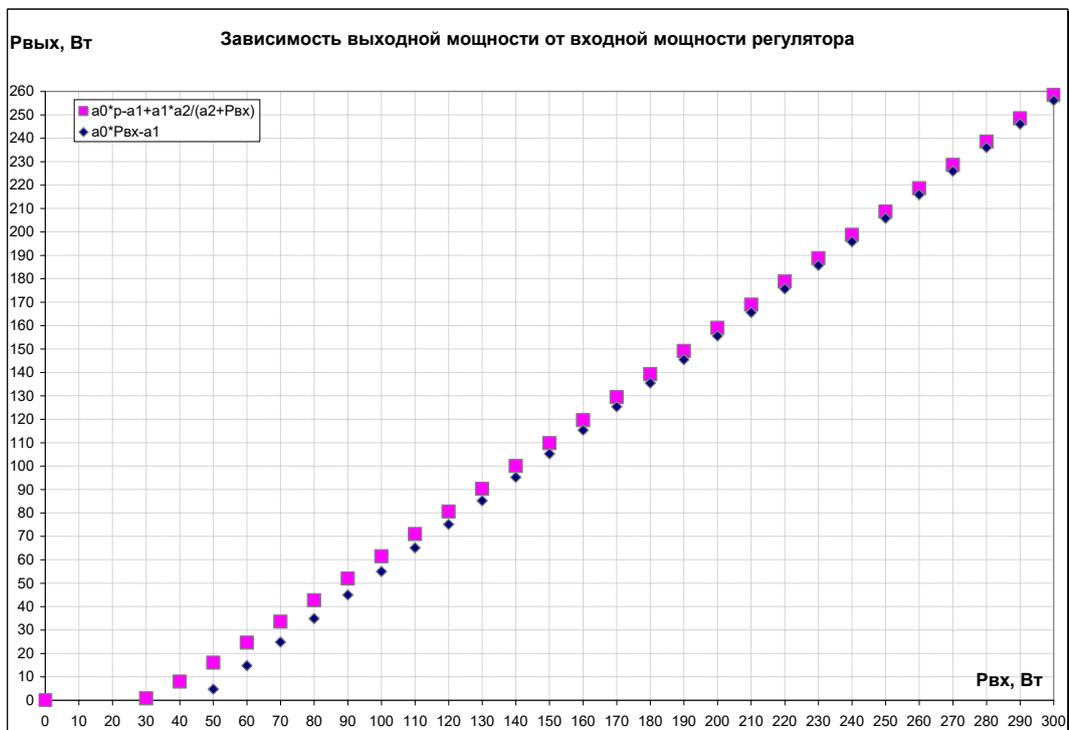


Рисунок 2.8 – График уравнения 2.25

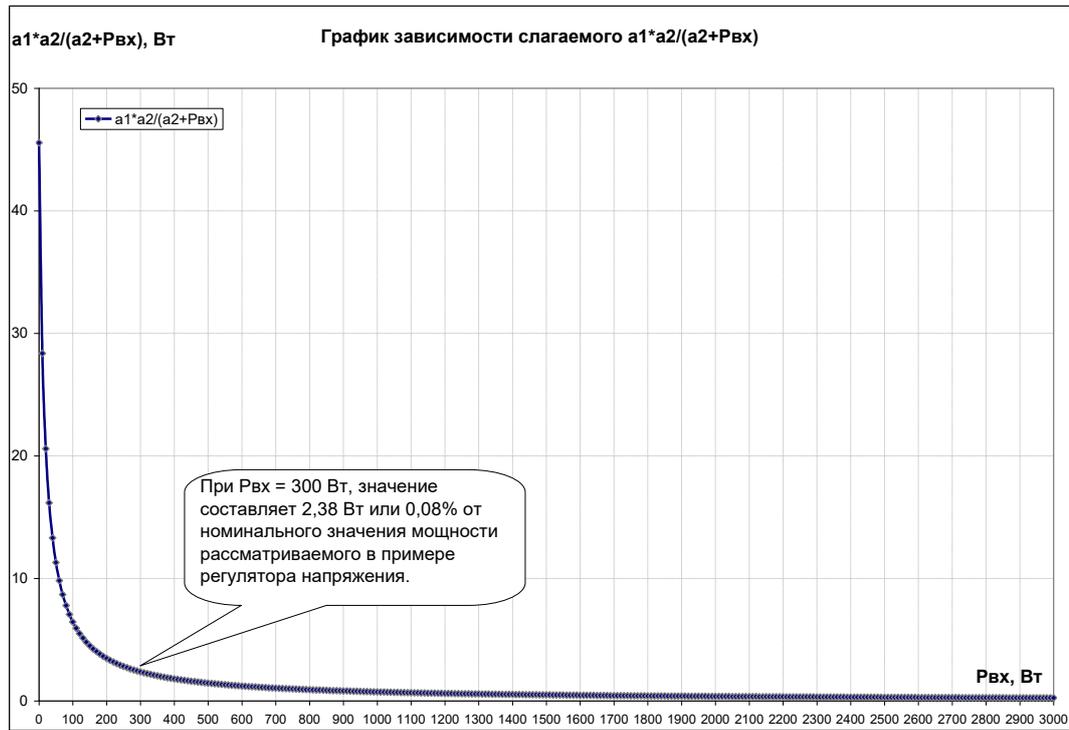


Рисунок 2.9 – График третьего слагаемого уравнения 2.26

Таким образом, слагаемое $\frac{a_1 \cdot a_2}{P_{\text{вх}} + a_2}$ в выражении (2.26) может быть исключено,

поскольку:

- нелинейность зависимости выходной мощности от входной проявляется при малых значениях мощности (для рассматриваемого примера до 300 Вт при номинальной мощности рассматриваемого в примере регулятора 3000 Вт);
- КПД в диапазоне мощностей до 10 % от номинальной мощности обычно не является предметом рассмотрения при энергетических расчетах систем электропитания КА;
- вклад третьего слагаемого выражения (2.26) при мощности более 10% от номинальной мощности составляет не более 0,08 %, откуда следует, что третьим слагаемым в выражении (2.26) можно пренебречь.

Таким образом, получено выражение зависимости выходной мощности регулятора от его входной мощности в виде (2.27) где:

- $b = P_{\text{соб}} = P_{\text{ВИП}} + P_{\text{per.const}}$ – собственное потребление регулятора;
- $k = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}} - P_{\text{соб}}}$ – коэффициент передачи мощности силового регулятора;

- знак минус перед слагаемым b показывает, что собственное потребление силового регулятора не является полезной мощностью, передаваемой в нагрузку, и поэтому вычитается из входной мощности.

В применимости данной модели также легко убедиться, если построить график зависимости измеренных значений $P_{\text{ВЫХ}}$ от $P_{\text{ВХ}}$. Такой график приведен на рисунке 2.10.

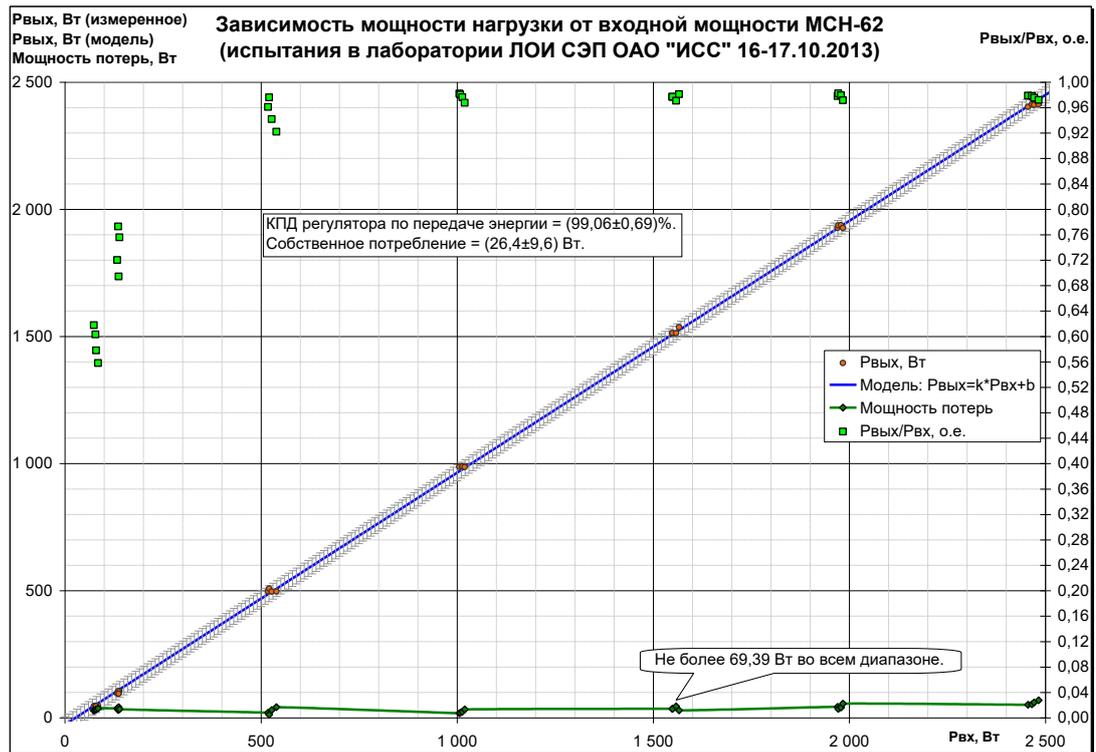


Рисунок 2.10 – График зависимости значений $P_{\text{ВЫХ}}$ от $P_{\text{ВХ}}$

Как видно по данным рисунка 2.10, полученная зависимость даёт погрешность аппроксимации около 0,7% во всем диапазоне мощностей при доверительной вероятности 99,73%, что более чем достаточно для выполнения энергетических расчетов и сравнительного анализа энергетических характеристик силовых узлов ЭПА [67].

Применение разработанного метода оценки энергетической эффективности ЭПА дает возможность создавать энергетическую модель ЭПА, применяя линейную модель. При этом параметры энергетической модели ЭПА представляются в виде постоянных коэффициентов: «коэффициент передачи мощности» и «собственное потребление», расчет которых осуществляется по экспериментальным данным.

Энергетическая модель ЭПА с использованием параметров «КПМ» и «собственное потребление ЭПА» описывается следующей системой уравнений (2.28):

$$\begin{cases} P_{\text{БС}}(t) = \frac{P_{\text{H}}(t) + P_{\text{соб}}}{K_{\text{СН}}} \Big| I_{\text{АБ}} = 0 \\ P_{\text{АБ}}^{\text{РАЗ}}(t) = \frac{P_{\text{БС}}(t) \cdot K_{\text{СН}} - (P_{\text{H}}(t) + P_{\text{соб}})}{K_{\text{РУ}}} \Big| I_{\text{АБ}} < 0, \\ P_{\text{АБ}}^{\text{ЗАР}}(t) = \left(P_{\text{БС}}(t) - \frac{P_{\text{H}}(t) + P_{\text{соб}}}{K_{\text{СН}}} \right) \cdot K_{\text{ЗУ}} \Big| I_{\text{АБ}} > 0 \end{cases} \quad (2.28)$$

где $P_{\text{БС}}(t)$ – текущая мощность БС, Вт; $P_{\text{АБ}}^{\text{РАЗ}}(t)$ – текущая мощность разряда АБ, Вт; $P_{\text{АБ}}^{\text{ЗАР}}(t)$ – текущая мощность заряда АБ, Вт; $P_{\text{H}}(t)$ – текущая мощность нагрузки, Вт; $P_{\text{соб}}$ – мощность собственного потребления ЭПА, Вт; $K_{\text{СН}}$ – коэффициент передачи мощности СН, о.е.; $K_{\text{РУ}}$ – коэффициент передачи мощности РУ, о.е.; $K_{\text{ЗУ}}$ – коэффициент передачи мощности ЗУ, о.е.; $I_{\text{АБ}}$ – ток АБ (положителен в режиме «заряд», отрицателен в режиме «разряд»), А; t – модельное время, с.

Реализация энергетической модели ЭПА в пакете инженерных расчетов MATLAB Simulink 2017b приведена на рисунке 2.11.

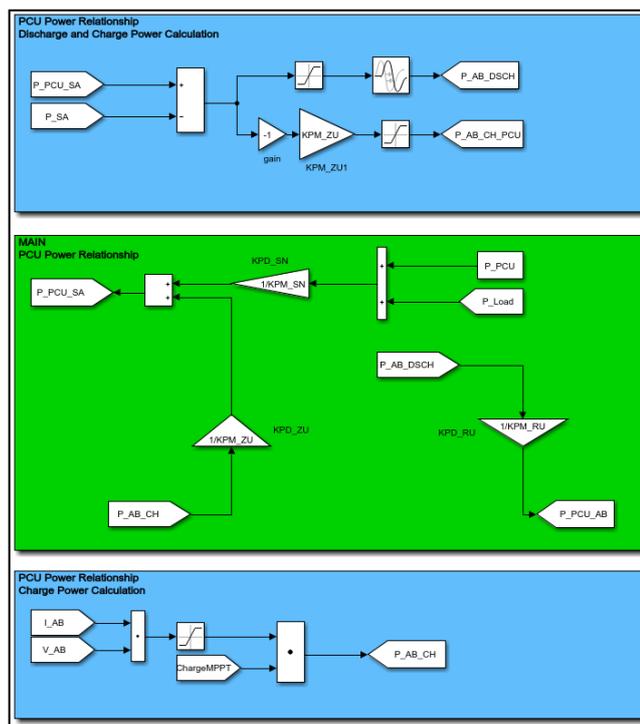


Рисунок 2.11 – Энергетическая модель ЭПА

На рисунке 2.11 использованы следующие обозначения:

- KPM_SN – значение коэффициента передачи мощности СН, о.е.;
- KPM_ZU – значение коэффициента передачи мощности ЗУ, о.е.;
- KPM_RU – значение коэффициента передачи мощности РУ, о.е.;
- P_Load – текущее значение мощности нагрузки, Вт;
- P_SA – текущее значение генерируемой мощности БС, измеренное на входных соединителях ЭПА, Вт;
- P_PCU – мощность собственного потребления ЭПА, Вт;
- P_PCU_SA – текущее значение мощности БС на входе в ЭПА, которое необходимо для питания нагрузки в режиме «заряд» комплекта АБ без ограничения тока заряда (в режиме работы экстремального регулятора мощности БС), Вт;
- P_AB_CH – текущее значение мощности заряда АБ на входе в ЭПА, без ограничения тока заряда (в режиме работы экстремального регулятора мощности БС), Вт;
- $P_AB_CH_PCU$ – текущее значение мощности заряда АБ на выходе ЭПА в режиме ограничения максимального тока заряда АБ, Вт;
- P_AB_DSCH – текущее значение мощности разряда АБ на выходе РУ, определяемое как разность, между мгновенным значением мощности БС и мгновенным значением мощности нагрузки, Вт;
- P_PCU_AB – текущее значение мощности разряда АБ на входе в ЭПА, Вт;
- $ChargeMPPT$ – флаг работы экстремального регулятора мощности БС в режиме «заряд», [0; 1];
- I_AB – текущее значение тока АБ, А;
- V_AB – текущее значение напряжения АБ, В.

Разработанная энергетическая имитационная модель ЭПА позволяет проводить расчет соотношения мгновенных значений мощностей БС, мощности заряда и разряда АБ в зависимости от изменения мощности нагрузки на каждом шаге модельного времени.

2.4 Имитационная модель СЭП

Для создания имитационной модели СЭП необходимо объединить ранее разработанные модели БС, АБ и энергетическую модель ЭПА, дополнив их функциями преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС.

Функции преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС удобно реализовать в имитационной модели СЭП с помощью инструмента «Stateflow» программного пакета MATLAB Simulink 2017b [68]. Внешний вид блока инструмента «Stateflow», реализующего управление алгоритмами работы ЭПА, приведен на рисунке 2.12.

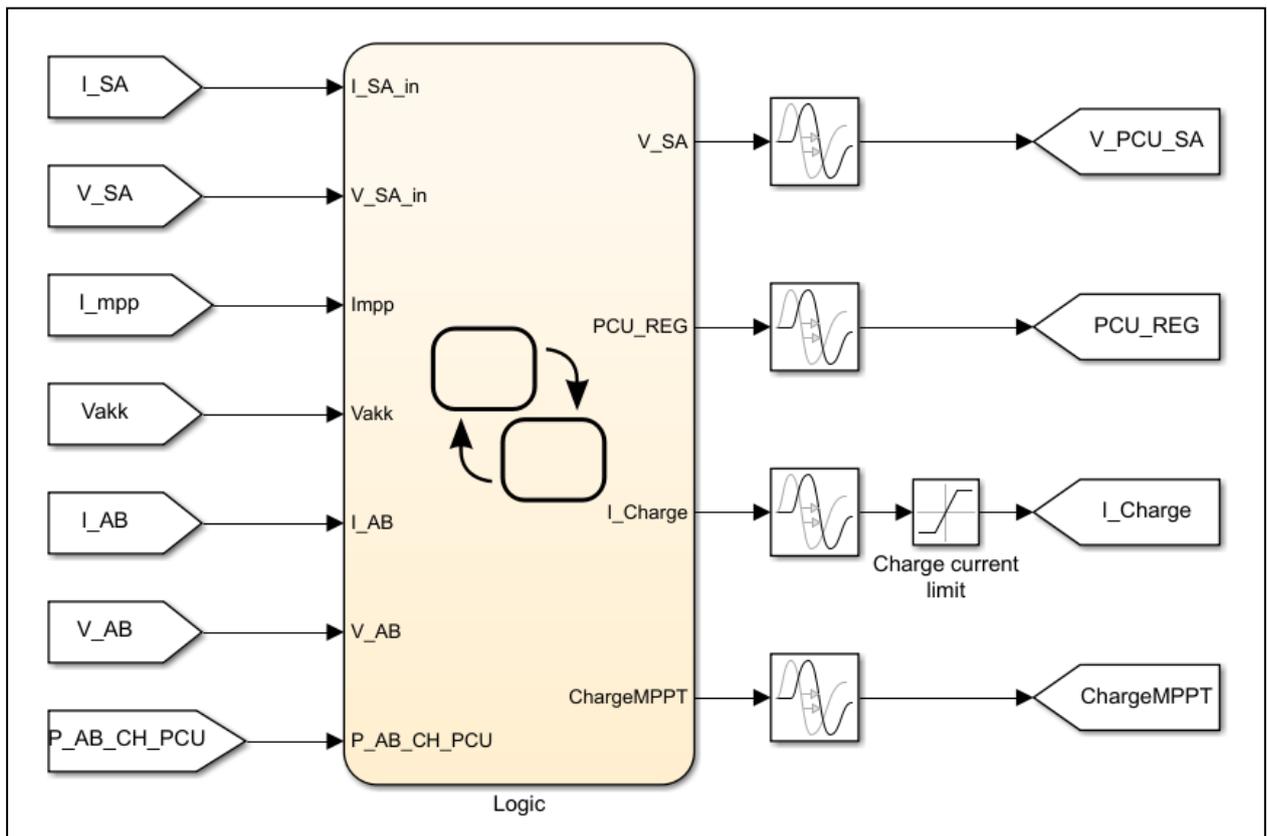


Рисунок 2.12 – Внешний вид алгоритма управления режимами работы ЭПА

Дополнительно, в алгоритме управления режимами работы ЭПА реализован режим заряда АБ падающим током, когда при достижении некоторого заранее определенного напряжения ЛИА, ток заряда снижается на некоторую величину, а заряд прекращается после снижения зарядного тока до нуля.

Алгоритм принимает входные и выдает выходные сигналы, представленные в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Сигналы алгоритма управления режимами работы ЭПА

Сигнал	Описание
Входные сигналы	
I_SA	Текущее значение тока БС, А
V_SA	Текущее значение напряжения БС, В
I_mpp	Текущее расчетное значение тока БС в точке максимальной мощности, А
Vakk	Текущее значение напряжения одного аккумулятора АБ, В
I_AB	Текущее значение тока АБ, А
V_AB	Текущее значение напряжения АБ, В
P_AB_CH_PCU	Текущее значение мощности заряда АБ на выходе ЭПА в режиме ограничения максимального тока заряда АБ, Вт
Выходные сигналы	
V_PCU_SA	Текущее значение напряжения БС, генерируемое алгоритмом экстремального регулирования мощности БС, В
PCU_REG	Флаг переключения подмодели интерфейса между моделями БС и ЭПА на работу в режиме управляемого источника тока или управляемого источника напряжения, (-1; 1). Когда флаг принимает значение «-1», к выходу модели БС подключается управляемый источник тока, когда флаг принимает значение «1», к выходу модели БС подключается управляемый источник напряжения
I_Charge	Текущее значение тока заряда АБ в режиме ограничения тока, А
ChargeMPPT	Флаг работы экстремального регулятора мощности БС в режиме заряда АБ всем избытком мощности БС (0; 1). Когда флаг принимает значение «0», осуществляется заряд АБ в режиме ограничения тока, а когда флаг принимает значение «1», заряд осуществляется всем избытком мощности БС, который обеспечивается работой алгоритма экстремального регулятора мощности БС

Внутренняя структура алгоритма управления режимами работы ЭПА, реализующими функции преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС, представлены на рисунке 2.13.

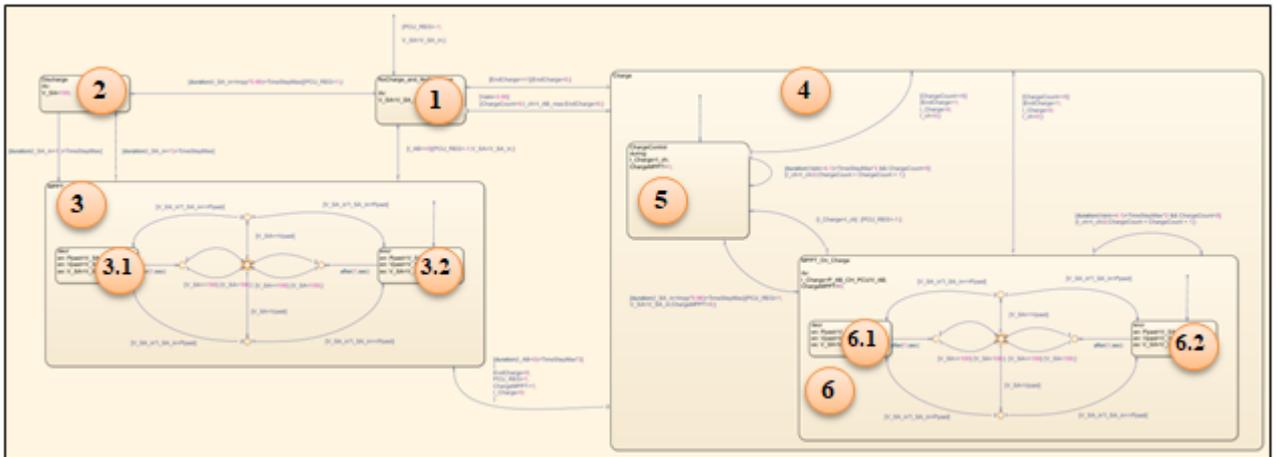


Рисунок 2.13 – Внутренняя структура алгоритма управления режимами работы ЭПА

Цифрами на рисунке 2.13 отмечены состояния (режимы работы), в которых может находиться ЭПА, а линиями – пути и условия перехода между состояниями. Перечень состояний ЭПА и условия перехода между ними приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Перечень состояний ЭПА и условия перехода между ними.

№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Колонка № 1 - № состояния по рис. 2.13			
Колонка № 2 – Описание состояния			
Колонка № 3 – № состояния, в которое возможен переход			
Колонка № 4 – Условия перехода в новое состояние			
№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1	Нет заряда и нет разряда АБ. Начальное состояние алгоритма по умолчанию	2	Ток БС превысил расчетное значение тока БС в точке максимальной мощности
		4	Напряжение одного аккумулятора АБ снизилось до уставки включения заряда
2	Разряд АБ при минимальном входном напряжении БС	3	Ток БС больше нуля
3	Работа алгоритма экстремального регулирования мощности БС в режиме разряда АБ	1	Ток разряда АБ равен нулю
		2	Ток БС отсутствует (КА в ТУЗ)
4	Заряд АБ	1	Заряд АБ завершен

№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
		3	Появление тока разряда АБ
		5	Переход по умолчанию
5	Заряд АБ в режиме ограничения максимального тока	4	Заряд АБ завершен
		5	Снижение тока заряда на одну ступень по достижению уставки отключения заряда
		6	Мощности БС недостаточно для осуществления заряда АБ в режиме ограничения максимального тока
6	Заряд АБ всем избытком мощности, который обеспечивается работой алгоритма экстремального регулирования мощности БС	4	Заряд АБ завершен
		5	Мощности БС достаточно для заряда АБ в режиме ограничения максимального тока
		6	Снижение тока заряда на одну ступень по достижении уставки отключения заряда
3.1, 6.1	Увеличение напряжения БС в рабочей точке на одну ступень	3.2, 6.2	На очередном шаге работы алгоритма мощность БС снизилась
3.2, 6.2	Снижение напряжения БС в рабочей точке на одну ступень	3.1, 6.1	На очередном шаге работы алгоритма мощность БС снизилась

Связь разработанных ранее моделей между собой обеспечивается интерфейсными блоками, представленными на рисунке 2.14. Здесь показана обобщенная модель ЭПА, состоящая из трех подмоделей, обозначенных цифрами:

- 1 - подмодель, реализующая интерфейс между моделью БС и моделью ЭПА;
- 2 - подмодель, реализующая энергетическую имитационную модель ЭПА;
- 3 - подмодель, реализующая интерфейс между моделями АБ и ЭПА.

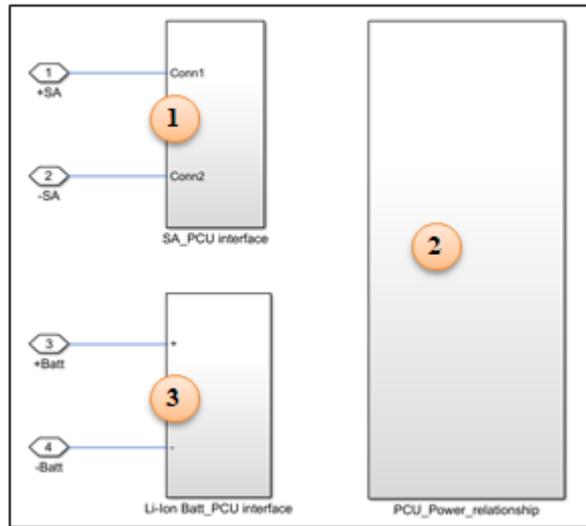


Рисунок 2.14 – Обобщенная модель ЭПА, состоящая из трех подмоделей
 Подмодель, реализующая интерфейс между моделями БС и ЭПА, представлена на рис. 2.15.

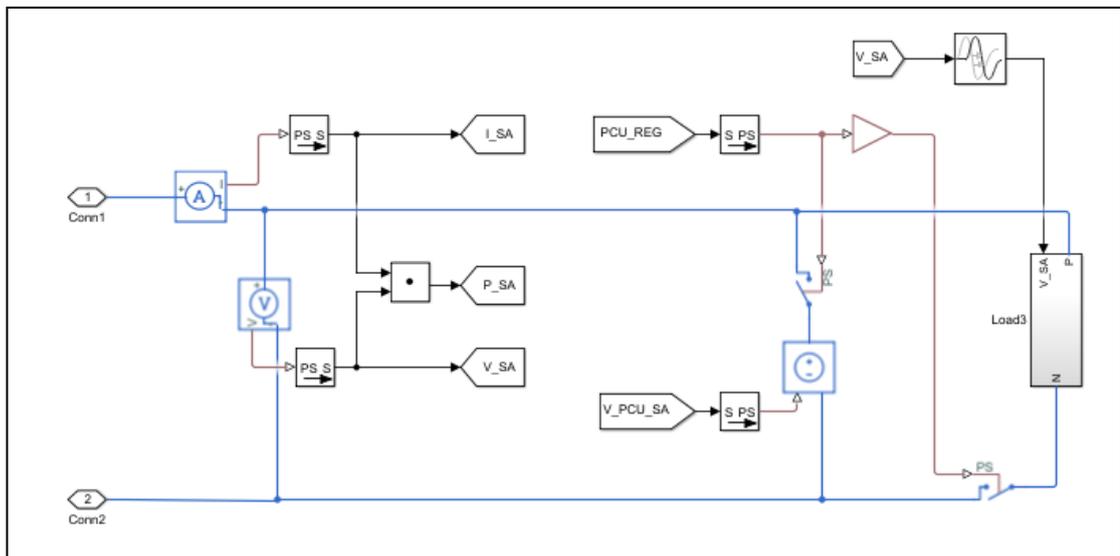


Рисунок 2.15 – Подмодель интерфейса между моделями БС и ЭПА
 Блок «Load3» в подмодели интерфейса между моделями БС и ЭПА также представляет собой подмодель, внешний вид которой показан на рисунке 2.16.

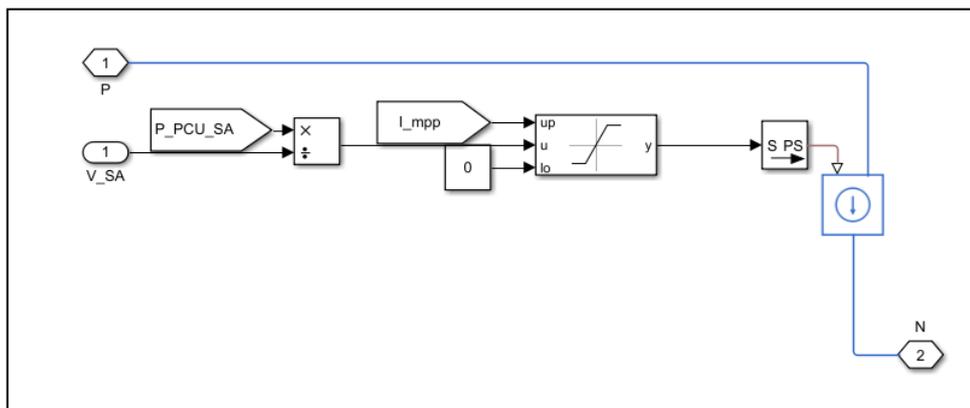


Рисунок 2.16 – Блок «Load3» в подмодели интерфейса между моделями БС и ЭПА

Подмодель, реализующая интерфейс между моделями БС и ЭПА, представляет собой управляемый источник тока и источник напряжения, которые подключены к выходу модели БС.

В случае если рабочая точка по напряжению находится на ветви напряжения ВАХ, к модели БС подключен источник тока. При этом входной сигнал для управляемого источника тока вычисляется по формуле

$$I_{\text{БС}}(t) = \frac{P_{\text{БС}}(t)}{V_{\text{БС}}(t - h)}, \quad (2.29)$$

где $I_{\text{БС}}(t)$ – текущее значение тока БС, А; $P_{\text{БС}}(t)$ – текущее значение мощности БС, Вт; $V_{\text{БС}}(t - h)$ – значение напряжения БС на предыдущем шаге модельного времени, В; t – текущее модельное время, с; h – шаг модельного времени, с.

В случае если рабочая точка по напряжению находится на ветви тока ВАХ, к модели БС подключен источник напряжения. При этом входным сигналом для источника напряжения является либо сигнал, генерируемый алгоритмом экстремального регулирования мощности БС, либо сигнал минимального входного напряжения БС на входе ЭПА.

Подмодель, реализующая интерфейс между моделями АБ и ЭПА, представлена на рисунке 2.17.

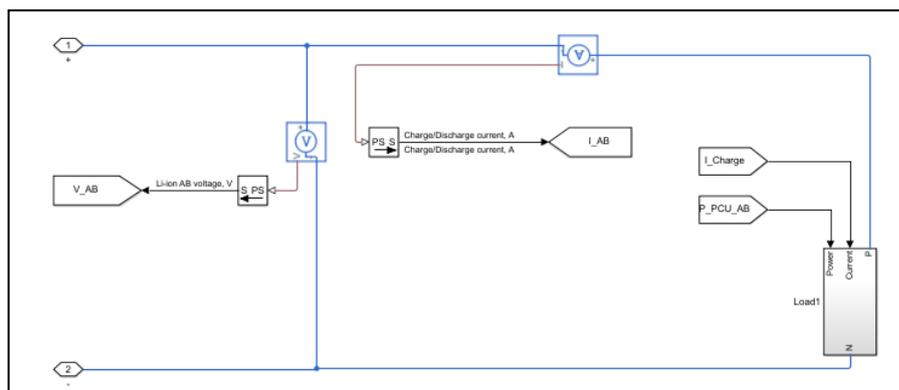


Рисунок 2.17 – Подмодель, реализующая интерфейс между моделями АБ и ЭПА

Подмодель, реализующая интерфейс между моделями АБ и ЭПА, также представляет собой управляемый источник тока и блоки измерения текущих значений напряжения и тока АБ. Входным сигналом, для управляемого источника

тока, подключенного к модели АБ, является либо значение требуемого тока заряда (в режиме «заряд») либо значение требуемой мощности разряда АБ. Значение требуемого тока заряда АБ подается непосредственно на вход управляемого источника тока. А значение мощности разряда АБ преобразуется в значение тока разряда по следующей формуле:

$$I_{\text{АБ}}(t) = \frac{P_{\text{АБ}}(t-h)}{V_{\text{АБ}}(t)}, \quad (2.30)$$

где $I_{\text{АБ}}(t)$ – текущее значение тока разряда АБ, А; $P_{\text{АБ}}(t-h)$ – значение мощности разряда АБ на предыдущем шаге модельного времени, Вт; $V_{\text{АБ}}(t)$ – текущее значение напряжения АБ, В; t – текущее модельное время, с; h - шаг модельного времени, с.

Внешний вид имитационной модели СЭП представлен на рисунке 2.18, 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.

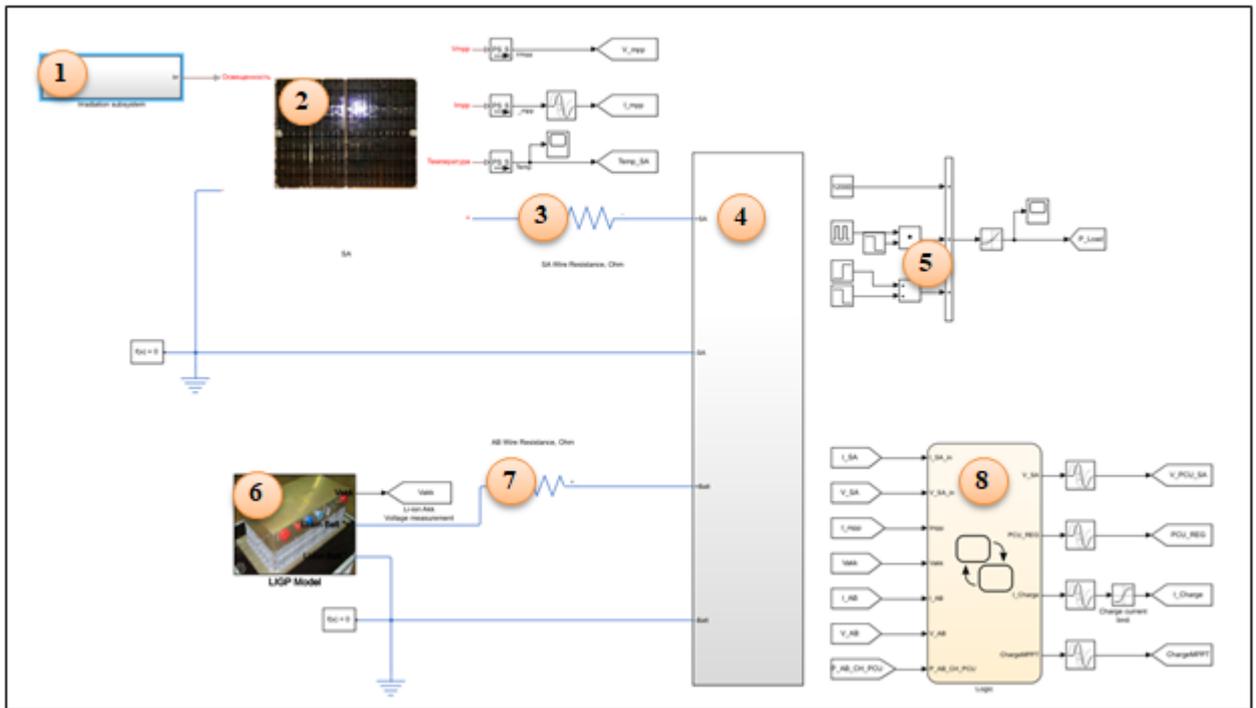


Рисунок 2.18 – Имитационная модель СЭП

Для подтверждения адекватности модели, а именно – для демонстрации адекватной работы алгоритма управления режимами ЭПА в части преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС, а также заряда АБ падающим током, параметры модели подобраны таким образом, чтобы она имитировала работу СЭП КА тяжелого класса на ГСО. В качестве прототипа выбрана СЭП КА «Экспресс-АМ5» на платформе «Экспресс-2000» разработки АО «ИСС» [36]. Количество последовательно и параллельно соединенных ФП в БС принято равным 60 и 360 шт. соответственно. В качестве модели ЛИАБ используются данные двух ЛИАБ в конфигурации 22×2ЛИ85.

В качестве входных данных модель использует тестовую циклограмму мощности нагрузки, которую СЭП необходимо обеспечить при работе по программе типового витка с прохождением ТУЗ максимальной длительности (72 минуты). Тестовая циклограмма нагрузки сформирована таким образом, что СЭП последовательно проходит следующие режимы работы.

1. Освещенный участок орбиты. Выход модели на установившийся режим из начальных условий.
2. Вход в ТУЗ.
3. Прохождение ТУЗ.
4. Выход из ТУЗ.

5. Включение заряда АБ в режиме ограничения максимального тока.
6. Заряд АБ всем избытком мощности БС при увеличении мощности нагрузки и недостатке мощности БС для питания нагрузки и заряда АБ в режиме токоограничения.
7. Переход из режима «заряд» в режим «разряд» и обратно при увеличении мощности нагрузки так, что максимальной мощности БС становится недостаточно для заряда АБ.
8. Завершение заряда АБ «падающим» током.

Результат функционирования имитационной модели СЭП в выбранной конфигурации для сформированной циклограммы нагрузки представлен на рисунке 2.19. Сформированные режимы работы СЭП отмечены на рисунке 2.19 цифрами в соответствии с приведенным выше перечислением.

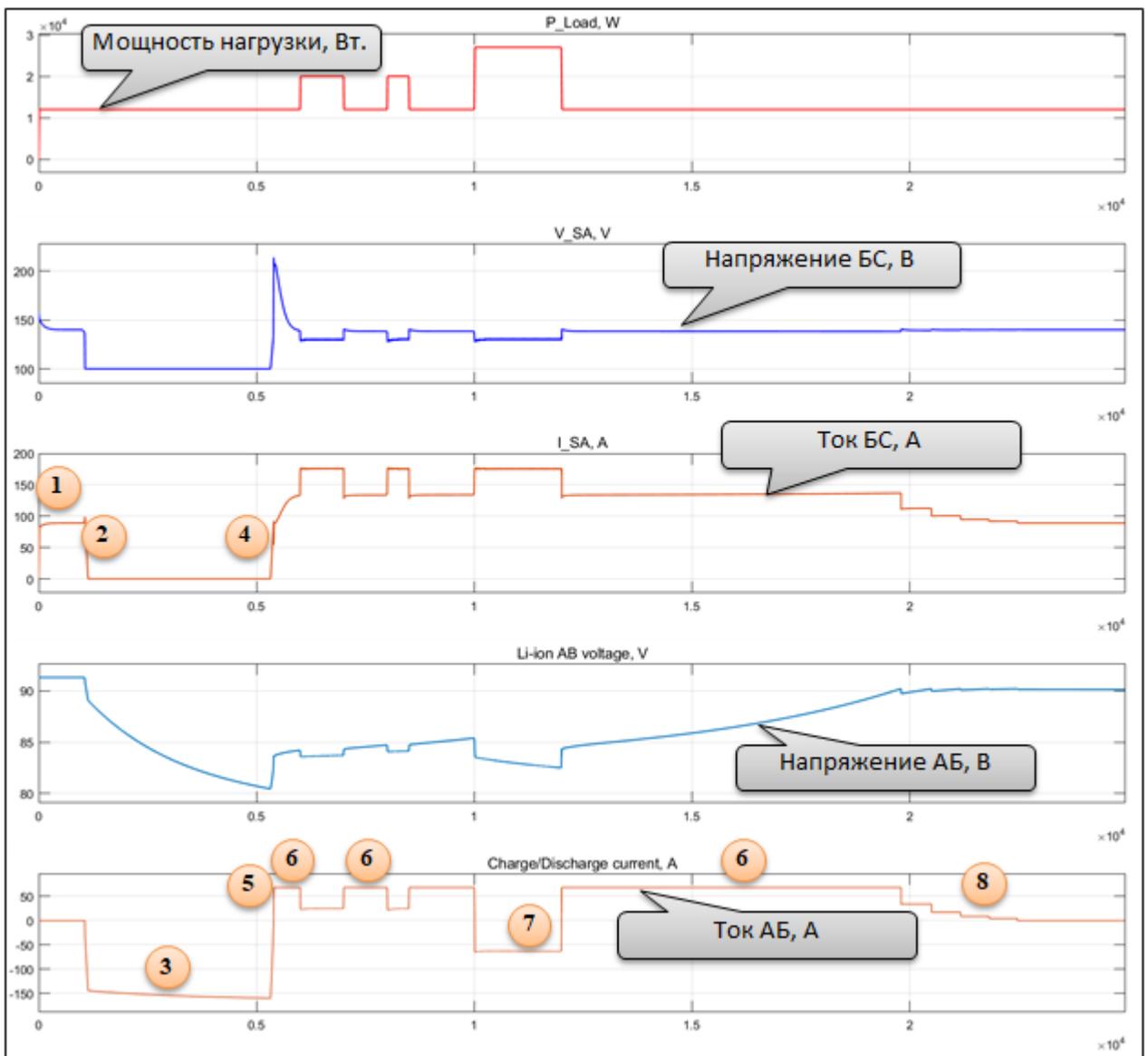


Рисунок 2.19 – График изменения параметров СЭП при тестировании разработанной имитационной модели СЭП

На рис. 2.20 представлен режим № 1 – выход модели на установившийся режим. На графике видно, что значения тока и напряжения БС изменяются от неких начальных значений до значений в установившемся и стационарном режиме (когда нет изменений мощности нагрузки и освещенности). Изменение значений тока и напряжения при выходе на установившийся режим обусловлено нагревом БС от начальной температуры ($28\text{ }^{\circ}\text{C}$) до рабочей температуры (около $60\text{ }^{\circ}\text{C}$).

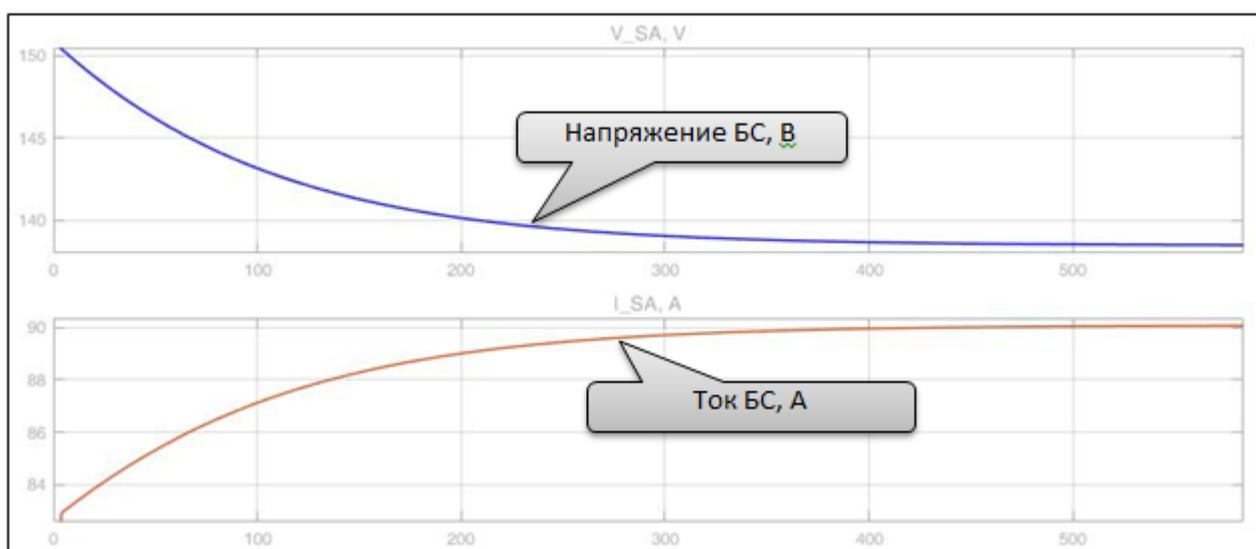


Рисунок 2.20 – Выход модели на установившийся режим

На рис. 2.21 представлены параметры БС и АБ в процессе имитации входа в ТУЗ. На графике видно, что перед входом в ТУЗ ЭПА работает в режиме СН, а рабочая точка по напряжению БС находится на ветви напряжения ВАХ БС. Алгоритм экстремального регулирования мощности при этом не задействован, так как мощности БС достаточно для питания нагрузки и задействования алгоритма ЭРМ не требуется.

В момент модельного времени 1000 с начинается имитация входа КА в ТУЗ путем линейного снижения коэффициента освещенности БС от исходного значения (1 о.е.) до нуля. Длительность входа в ТУЗ 130 секунд.

Видно, что при снижении освещенности и, соответственно, снижении тока короткого замыкания БС и мощности БС происходит движение рабочей точки по напряжению влево по ВАХ БС, и напряжение на БС снижается. При этом возрастает ток БС, так как при движении рабочей точки по ВАХ БС ток БС

увеличивается, приближаясь к значению тока БС в точке максимальной мощности. В момент, когда рабочая точка на ВАХ БС достигает значения точки максимальной мощности БС, происходит скачкообразное снижение напряжения БС до значения минимального входного напряжения БС в ЭПА. При этом в ходе дальнейшего снижения значения коэффициента освещенности БС происходит снижение тока БС, так как рабочая точка находится уже на ветви тока ВАХ БС.

После снижения напряжения БС на входе в ЭПА до минимального значения происходит включение алгоритма ЭРМ, и напряжение БС начинает изменяться. Однако движения рабочей точки по напряжению БС в сторону значения напряжения в точке максимальной мощности не происходит. Это обусловлено тем, что быстродействия ЭРМ недостаточно для отслеживания достаточно быстро изменяющейся в процессе входа в ТУЗ ВАХ БС. Действительно, при входе в ТУЗ и включении алгоритма ЭРМ на каждом шаге работы алгоритма за счет снижения ВВХ мощность БС, анализируемая алгоритмом, оказывается меньше, чем мощность БС на предыдущем шаге. Для парирования данного эффекта требуется задать такие требования к шагу ЭРМ по времени и по напряжению, при которых отслеживание алгоритмом ЭРМ параметров динамических изменяющейся ВАХ БС становится возможным. Типичные параметры быстродействия ЭРМ в ЭПА СЭП геостационарных КА составляет около 0,5 В/ 0,5 с, в то время как, для обеспечения возможности отслеживания точки максимальной мощности БС при входе КА в ТУЗ, быстродействие ЭРМ требуется увеличить кратно. Методика формирования требований к быстродействию ЭРМ приведена, например, в [69].

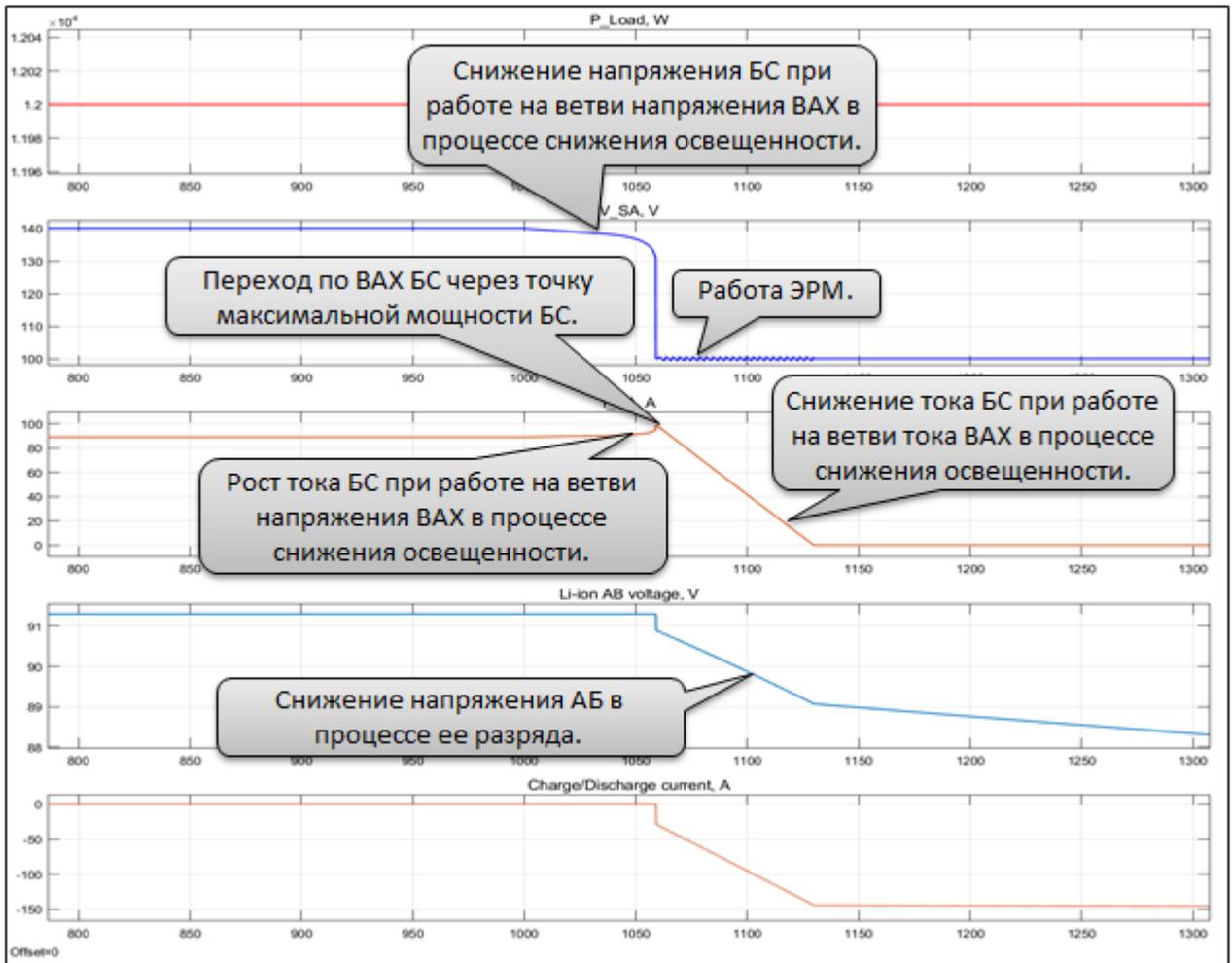


Рисунок 2.21 – Параметры АБ и БС при имитации входа в ТУЗ

Далее, при снижении тока БС до нуля работа ЭРМ прекращается, и происходит питание нагрузки за счет разряда АБ.

Таким образом, в режиме № 2 модель адекватно воспроизводит ожидаемое изменение параметров СЭП.

На рисунке 2.22 представлены графики параметров СЭП в режиме № 3, т.е. при прохождении ТУЗ. По графикам рис. 2.22 видно, что напряжение и ток АБ изменяются ожидаемым образом. При постоянной мощности нагрузки происходит нелинейное снижение напряжения и тока АБ, а форма изменения напряжения и тока АБ соответствует наблюдаемой форме изменения этих параметров при разряде реальной АБ.

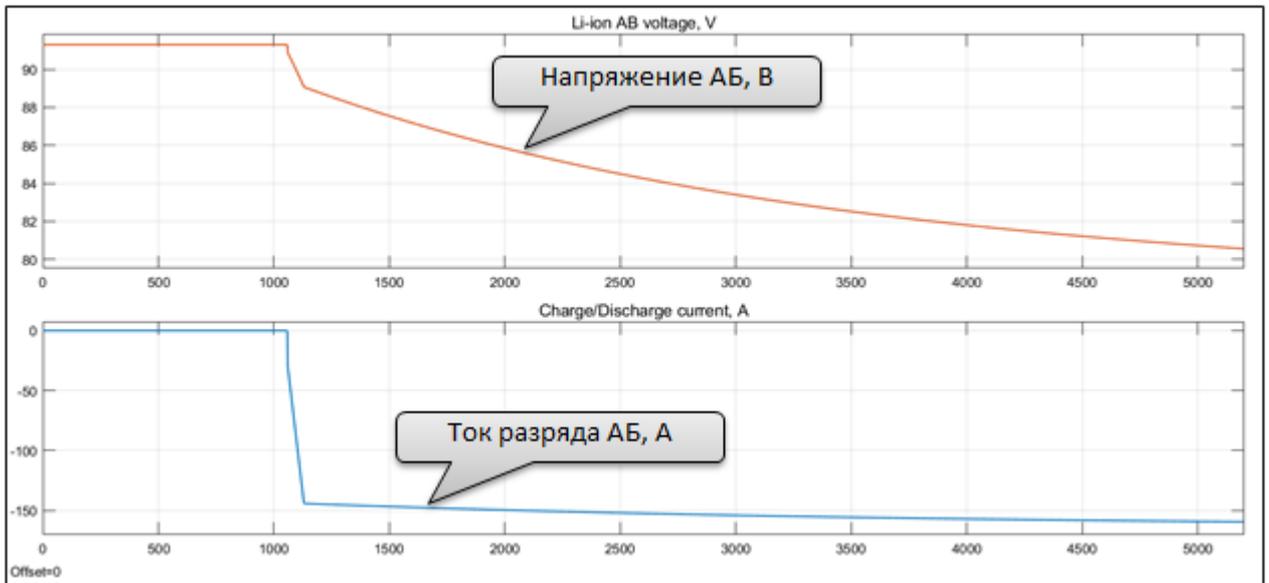


Рисунок 2.22 – Ток и напряжение АБ при прохождении ТУЗ

В режимах № 4 и № 5, т.е. в процессе выхода КА из ТУЗ с включением заряда АБ в режиме ограничения максимального тока, графики параметров СЭП представлены на рисунке 2.23.

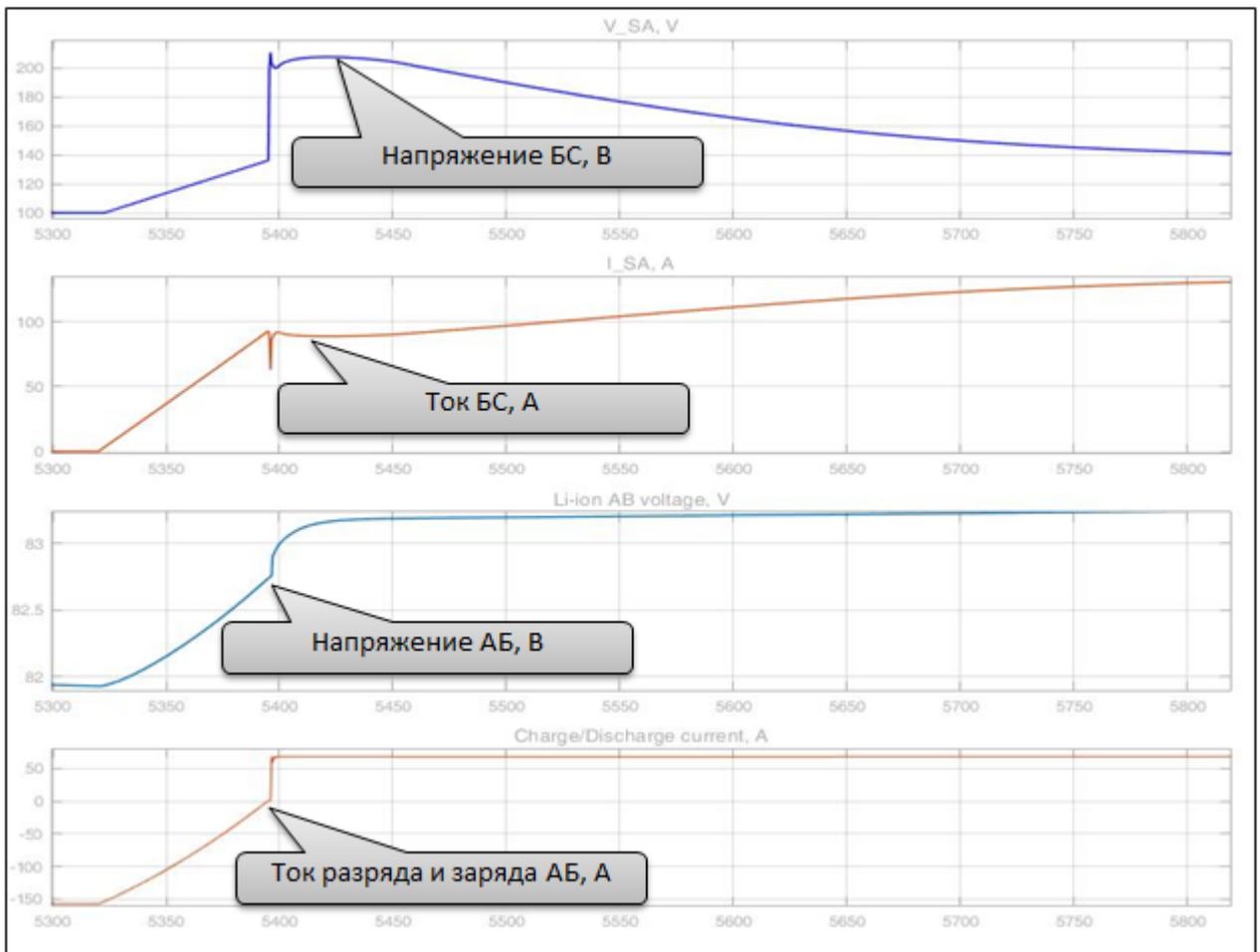


Рисунок 2.23 – Параметры СЭП при выходе из ТУЗ

На графиках рис. 2.23 видно, что при появлении мощности БС начинает снижаться ток разряда АБ и, соответственно, увеличивается напряжение АБ по мере снижения тока разряда. При этом работает алгоритм ЭРМ, увеличивая напряжение рабочей точки БС и приближая его к значению напряжения в точке максимальной мощности. В момент, когда ток разряда АБ становится равным нулю, происходит отключение алгоритма ЭРМ, а рабочая точка по напряжению БС скачком перемещается на ветвь напряжения ВАХ БС. Одновременно включается заряд АБ в режиме ограничения максимального тока. При этом алгоритм ЭРМ отключен, т.к. мощности БС при работе ЭПА в режиме СН достаточно для питания нагрузки и заряда АБ максимальным током. Далее наблюдается снижение напряжения и рост тока БС в рабочей точке за счет нагрева БС после выхода из ТУЗ.

На рисунке 2.24 представлены графики параметров СЭП в режиме № 6, т.е. при заряде АБ всем избытком мощности БС при импульсном увеличении мощности нагрузки на 8 кВт относительно постоянного значения (12 кВт).

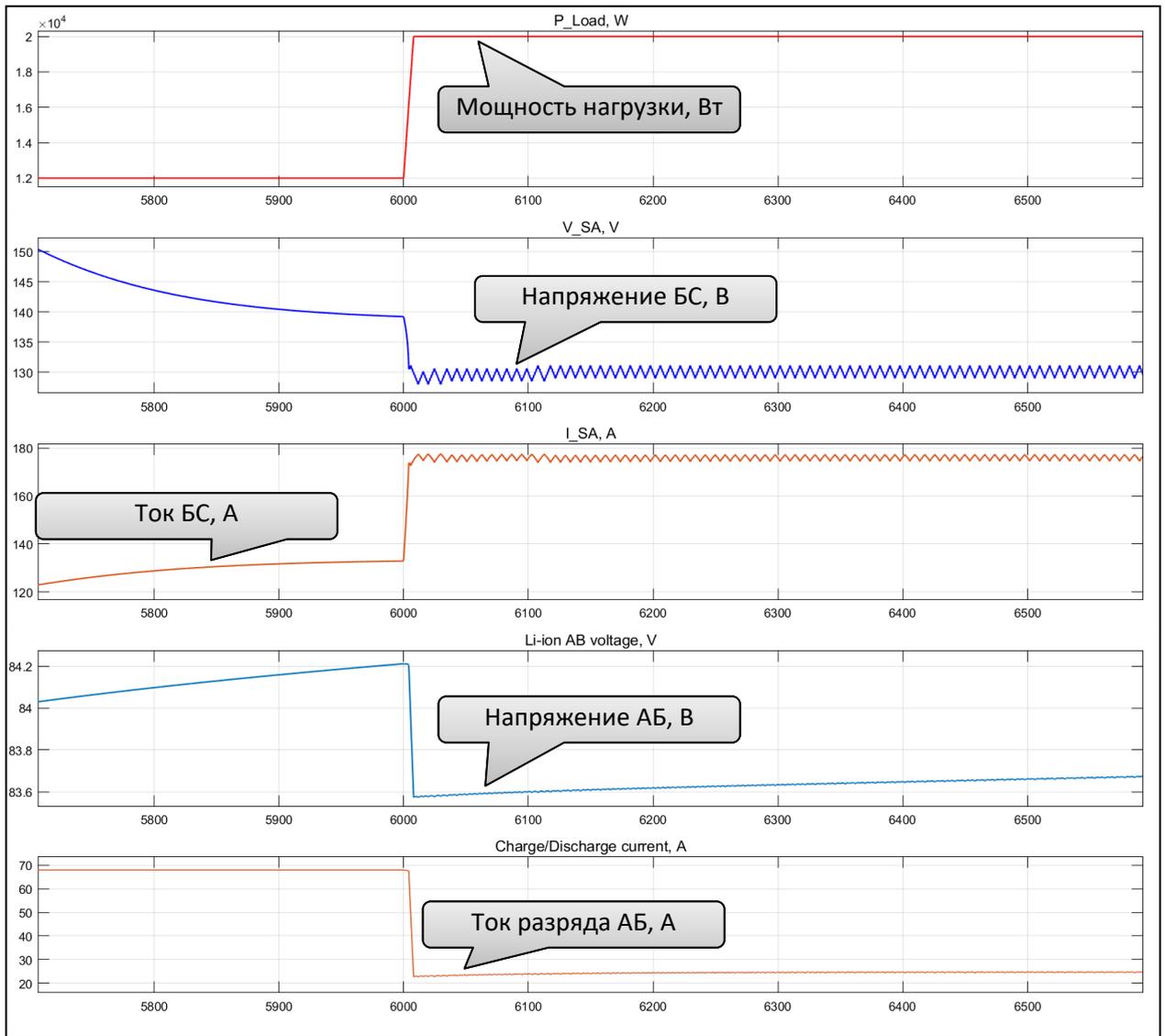


Рисунок 2.24 – Параметры СЭП в режиме заряда АБ и работы ЭРМ

На графиках рис. 2.24 видно, что при увеличении мощности нагрузки до значения, когда мощности БС недостаточно для обеспечения заряда АБ в режиме ограничения максимального тока, происходит включение алгоритма ЭРМ. При этом обеспечивается отслеживание точки максимальной мощности на ВАХ БС, а заряд АБ осуществляется всем имеющимся избытком мощности БС.

На рисунке 2.25 показан режим № 7, когда СЭП при импульсном увеличении мощности нагрузки переходит из режима заряда АБ в режим разряда АБ.

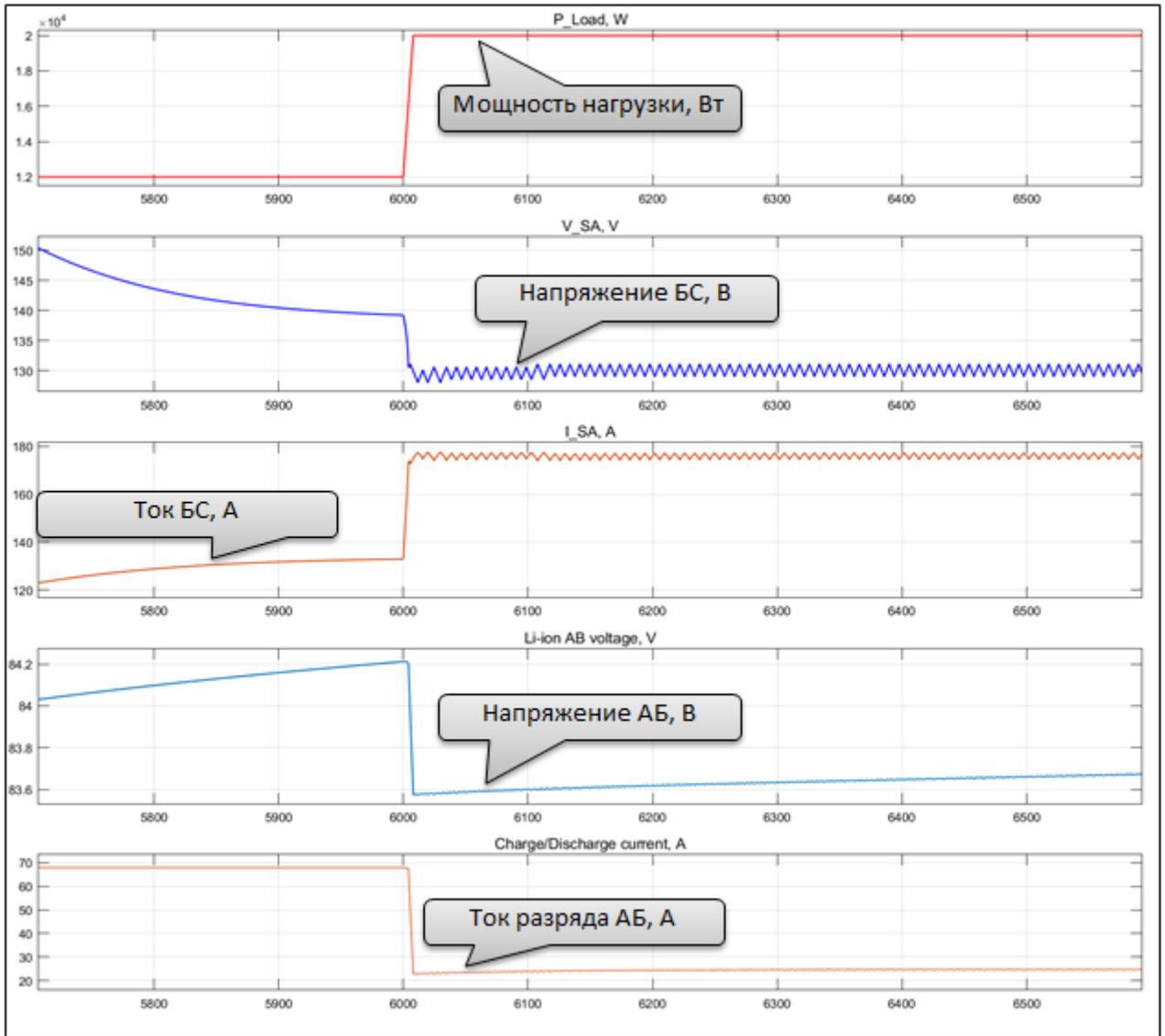


Рисунок 2.25 – Параметры СЭП при переходе из режима «заряд» в режим «разряд»

На графиках рис. 2.25 видно, что при импульсном увеличении мощности нагрузки на 15 кВт (с исходных 12 кВт) мощности БС недостаточно не только для заряда АБ, но и для питания нагрузки. Поэтому в момент увеличения мощности нагрузки происходит смена режима «заряд» на режим «разряд». При этом включается в работу алгоритм ЭРМ, обеспечивая отбор максимальной мощности БС и, соответственно, минимизацию мощности разряда АБ. Наблюдаемое изменение параметров СЭП в рассматриваемом режиме соответствует ожидаемому изменению.

На рисунке 2.26 представлены графики изменения параметров СЭП в режиме № 8, т.е. при завершении процесса заряда АБ «падающим» током.

На графиках рис. 2.26 видно, что по достижении напряжением АБ некоторого значения, которое определяется как сумма напряжений аккумуляторов АБ, происходит снижение тока заряда АБ вдвое (в соответствии с заложенной логикой). При этом напряжение и ток БС изменяются в соответствии с изменившейся мощностью заряда АБ. Изменения параметров АБ и БС соответствуют ожидаемому характеру их изменения.

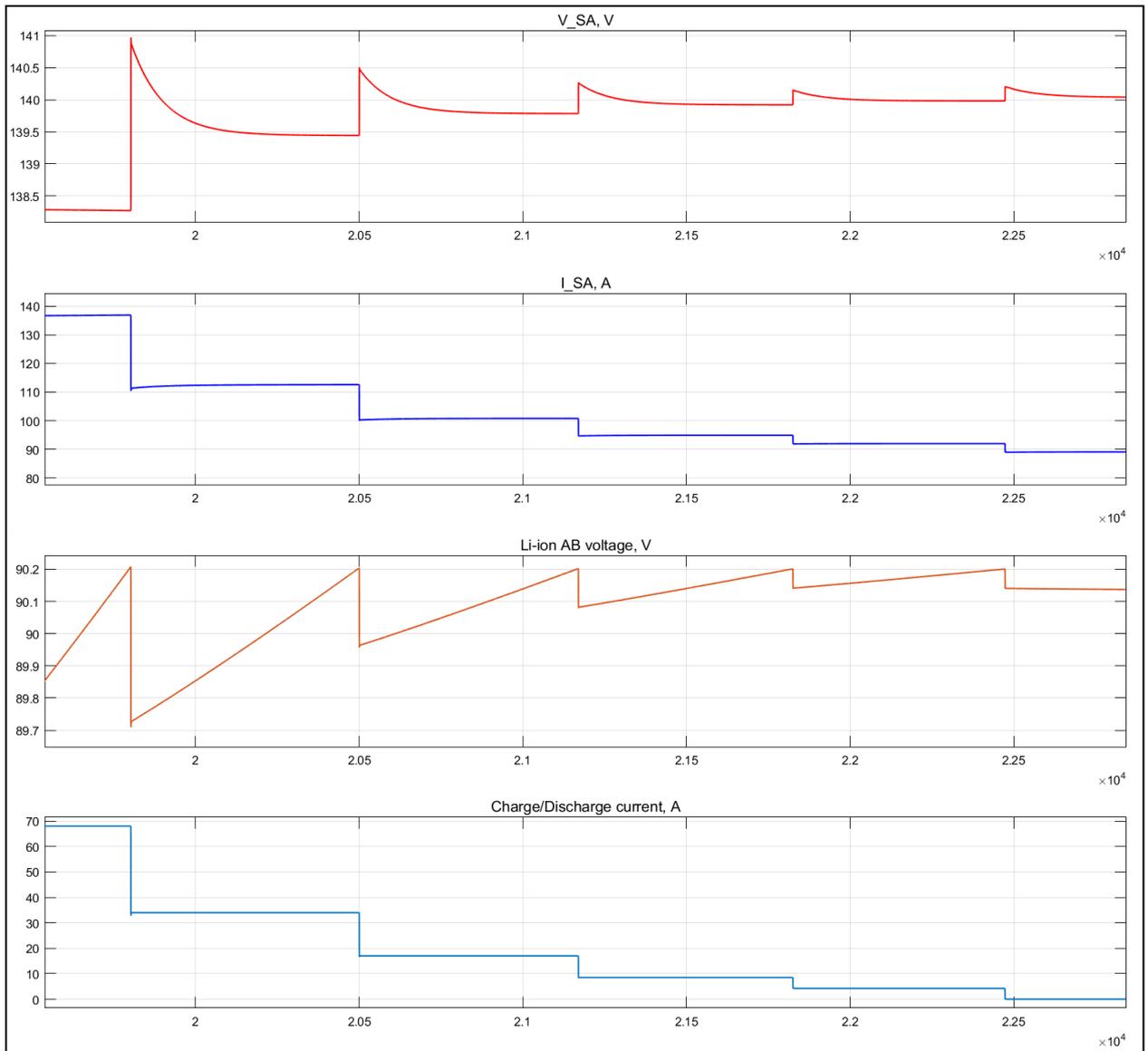


Рисунок 2.26 – Заряд АБ «падающим» током

Таким образом, путем проведения вычислительного эксперимента на тестовой циклограмме нагрузки показана адекватность имитационной модели СЭП в целом. Имитационная модель СЭП адекватно воспроизводит ВАХ БС, разрядно-зарядную характеристику ЛИАБ, параметры энергетической эффективности ЭПА, а также обеспечивает выполнение функций

преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС и обеспечения заряда ЛИАБ падающим током.

Важно отметить, что функция экстремального регулирования мощности БС в составе ЭПА СЭП дает дополнительные, по сравнению с ЭПА без функции экстремального регулирования мощности БС, возможности для оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА. Так, в [70] показано, что за счет наличия функции экстремального регулирования мощности БС удастся снизить площадь (а следовательно, и массу) БС в ЭПА с выходной мощностью 5 кВт, удастся снизить требуемую площадь БС на 1 м^2 (4% площади БС) при выполнении условий положительного энергобаланса.

Разработанная имитационная модель СЭП позволяет проводить расчет энергобаланса геостационарного КА с одновременным определением предельных значений токов и напряжений БС и АБ, т.е. с формированием требований к межблочному силовому интерфейсу СЭП [87]. При этом учтена нестационарность ВАХ БС и разрядно-зарядной характеристики ЛИАБ.

Для оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА используются следующие свойства разработанной имитационной модели СЭП:

- адекватность имитационных моделей БС, АБ с учетом нестационарности их характеристик;
- адекватность линейной энергетической имитационной модели ЭПА;
- масштабируемость модели, которая осуществляется путем изменения количественного состава элементов, составляющих БС и АБ, а также ЭПА (количество ФП в БС, количество и ёмкость аккумуляторов в АБ, количество и выходная мощность силовых модулей в ЭПА);
- преимущественное использование, а также экстремальное регулирование мощности БС;
- заряд АБ в квазипотенциостатическом режиме;

- автоматическое определение предельных значений токов и напряжений БС и АБ, обеспечивающее формирование требований к параметрам межблочного силового интерфейса СЭП;
- возможность изменения параметров модели в цикле решения оптимизационной задачи с применением методов многомерной оптимизации.

На имитационную модель СЭП геостационарного КА в статическом режиме работы получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ [71].

2.5 Выводы

Предложенные имитационные модели для статических режимов работы БС и АБ учитывают нестационарность их характеристик с возможностью масштабирования количественного состава фотопреобразователей и аккумуляторов. Применение данных моделей в методике оценки энергетической эффективности ЭПА является наиболее рациональным решением при проектировании и разработке СЭП перспективных КА.

Дополнительно введенные параметры энергетической эффективности ЭПА: «коэффициент передачи мощности» и «собственное потребление» - позволяют получить адекватную оценку энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры с погрешностью не более 1,5% по критерию трех сигм нормального распределения ошибки случайной величины.

Предложенная имитационная модель СЭП содержит не только модели ее составных частей, но и функции преимущественного использования и экстремального регулирования мощности БС и заряда ЛИАБ в квазипотенциостатическом режиме. Адекватность имитационной модели СЭП подтверждается путем проведения вычислительного эксперимента с использованием тестовой циклограммы нагрузки. Расчетные и экспериментальные значения отличаются не более чем на 3 %, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, приведенных в главе 4.

Показано, что применение в составе СЭП геостационарного КА экстремального регулятора мощности позволяет осуществить уменьшение требуемой для выполнения условий положительного энергобаланса площади БС на 1 м^2 (4% площади БС) по уровню выходной мощности СЭП 5 кВт.

Глава 3. Оптимизация энергомассовых характеристик системы электропитания

На основе моделей системы электропитания, полученных в предыдущей главе, рассмотрим далее поиск оптимального сочетания диапазонов входных напряжений ЭПА СЭП, наилучшего с точки зрения критерия удельной мощности. Решение такой задачи обуславливает необходимость выполнения следующих действий:

- формирование функции расчета массы СЧ СЭП;
- выделение из состава СЭП подсистем, которые могут иметь экстремальный характер энергомассовых характеристик в зависимости от вариаций параметров элементов, входящих в состав этих подсистем;
- исследование функций расчета массы и энергомассовых характеристик выделенных подсистем;
- формирование расчетных случаев для определения энергетического баланса геостационарного КА;
- разработку алгоритма оптимизации энергомассовых характеристик СЭП;
- оптимизацию энергомассовых характеристик СЭП по разработанному алгоритму.

3.1 Формирование функций расчета массы составных частей СЭП для проведения оптимизации её энергомассовых характеристик

Рассмотрим функциональную зависимость массы БКС системы электропитания от параметров их силовых проводов.

В составе БКС СЭП обычно применяются провода марки МСЭ 26-15 по ТУ16.К76-160-2000 [72], которые имеют ряд значений площади поперечного сечения: 0,08, 0,12, 0,2, 0,35, 0,5 мм². Силовая БКС в общем случае может представлять собой набор проводов с указанными выше сечениями, обеспечивающий протекание требуемого тока. Вместе с тем рассмотрение характеристик проводов указанных сечений показывает, что наилучшей энергомассовой эффективностью обладает провод с площадью поперечного сечения 0,2 мм². То есть отношение сопротивления провода с площадью

поперечного сечения $0,2 \text{ мм}^2$ (для многожильных проводов) к его массе оказывается меньше, чем для проводов с площадью поперечного сечения $0,35$ и $0,5 \text{ мм}^2$. Провода с площадью поперечного сечения менее $0,2 \text{ мм}^2$ в силовой БКС СЭП, как правило, не применяются. Учитывая, что мощность полезной нагрузки геостационарных КА составляет от 6 до 20 кВт, площадь поперечного сечения силовой БКС должна быть такой, чтобы обеспечить протекание тока около 100 А, что обуславливает применение многожильных проводов по ТУ16.К76-160-2000. Поэтому наиболее выгодным с точки зрения энергомассовых характеристик является применение провода с площадью поперечного сечения $0,2 \text{ мм}^2$.

Сравнительные расчетные характеристики для жил кабеля с различной площадью поперечного сечения для общей площади сечения токопроводящих жил 14 мм^2 представлены в таблице 3.1. Исходные данные для расчета массы силовой БКС приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Сравнительные расчетные характеристики жил кабеля

Площадь сечения жилы, мм^2	Удельное сопротивление, Ом/км	Удельная масса, кг/км	Для кабеля $S=14 \text{ мм}^2$			
			Количество жил, шт	Удельное сопротивление, Ом/км	Удельная масса, кг/км	Сопротивление на единицу массы, мОм/кг
0,2	88	2,58	70	1,26	181,3	6,934
0,35	52,8	4,16	40	1,32	166,4	7,932
0,5	40,4	5,34	28	1,44	149,5	9,649

Таблица 3.2 – Исходные данные для расчета массы силовой БКС

Параметр	Знач.	Обозн.
Сечение одного провода, мм^2	0,2	$S_{0.2}$
Сопротивление одного километра провода, Ом	88	$R_{уд.0.2}$
Масса одного километра провода, кг	2,58	$M_{уд.0.2}$
Длина БКС от БС до ЭПА, м	15	$L_{БКС_БС}$
Длина БКС от АБ до ЭПА, м	3	$L_{БКС_АБ}$
Допустимое отклонение сопротивления провода при поставке и приемке	1,2	$K_{БКС_1}$
Температурный коэффициент сопротивления	1,3	$K_{БКС_2}$
Расчетно-экспериментальный коэффициент, учитывающий массу изоляции, соединителей и крепежа, входящих в БКС	1,65	$K_{БКС_3}$

На основе анализа представленных исходных данных масса силовой БКС может быть определена с помощью следующих выражений:

$$M_{\text{БКС}_\text{БС}}(n) = L_{\text{БКС}_\text{БС}} \cdot 10^{-3} \cdot M_{\text{уд}_0.2} \cdot K_{\text{БКС}_3} \cdot n; \quad (3.1)$$

$$M_{\text{БКС}_\text{АБ}}(n) = L_{\text{БКС}_\text{АБ}} \cdot 10^{-3} \cdot M_{\text{уд}_0.2} \cdot K_{\text{БКС}_3} \cdot n, \quad (3.2)$$

где $M_{\text{БКС}_\text{БС}}(n)$ и $M_{\text{БКС}_\text{АБ}}(n)$ – соответственно масса БКС между БС и ЭПА и масса БКС между АБ и ЭПА, кг; n – требуемое количество проводов площадью поперечного сечения $0,2 \text{ мм}^2$.

При проектировании систем электропитания космических аппаратов масса используемой ЛИАБ с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть задана в виде требования к удельным характеристикам известного прототипа батареи. Для этого используется её удельная энергоемкость, т.е. отношение максимальной энергии к массе.

Данный подход применим для случая, когда при постоянном количестве аккумуляторов в АБ изменяется их ёмкость и, соответственно, энергоёмкость, рассчитанная из условия положительного (или нулевого) энергодбаланса.

Вместе с тем для проведения оптимизации энергомассовых характеристик СЭП требуется варьировать не только ёмкостью, но и количеством аккумуляторов. В частности, требуется варьировать количеством аккумуляторов при сохранении энергоёмкости ЛИАБ, найденной в результате расчета энергодбаланса. В этом случае точность оценки массы ЛИАБ по известной удельной энергоёмкости прототипа при изменении количества аккумуляторов и постоянной энергоёмкости ЛИАБ будет ухудшаться. Так, масса ЛИАБ фиксированной энергоёмкости будет тем больше, чем большее количество аккумуляторов она содержит, за счет увеличения доли массы ЛИАБ, приходящейся на конструкцию (корпуса ЛИА и ЛИАБ, крепежные элементы, электромонтаж и т.д.). Поэтому для оценки массы ЛИАБ в процессе оптимизации энергомассовых характеристик СЭП требуется сформировать функцию расчета

массы ЛИАБ, учитывающую изменение доли массы ЛИАБ, приходящейся на конструктивные элементы ЛИАБ.

В качестве прототипа ЛИАБ, по характеристикам которой осуществляется расчет массы ЛИАБ произвольной ёмкости и количества аккумуляторов, применяется ЛИАБ 2×22ЛИ-85, характеристики которой были использованы для идентификации параметров имитационной модели ЛИАБ. Используемые для расчета массы характеристики ЛИАБ 2×22ЛИ-85 приведены в таблице 3.3 [73].

Таблица 3.3 – Характеристики ЛИАБ 2×22ЛИ-85 используемые для расчета массы

Параметр	Значение	Обозначение
Масса одного аккумулятора ЛИГП-85, кг	2,34	$M_{\text{ЛИГП85}}$
Ёмкость одного аккумулятора, А·ч	103	$C_{\text{ЛИГП85}}$
Масса одного блока АБ, состоящего из 22 аккумуляторов, кг	58,5	$M_{22\text{ЛИ85}}$
Масса одного байпасного устройства (БЭ-200), кг	0,100	$M_{\text{БП200}}$
Масса одного байпасного устройства (БЭ-100), кг	0,068	$M_{\text{БП100}}$
Масса одного байпасного устройства (БЭ-50), кг	0,055	$M_{\text{БП50}}$
Объем ЛИАБ 2*22ЛИ-85, м ³	0,048045312	$V_{2 \times 22\text{ЛИ85}}$
Объем аккумулятора ЛИГП-85, м ³	1,099644E-3	$V_{\text{ЛИГП85}}$
Удельная масса корпуса ЛИА (алюминий), кг/м ³	2,7E+3	$M_{\text{Корп_ЛИА_УД}}$
Толщина корпуса ЛИА, м	0,001	$\Delta l_{\text{Корп_ЛИА}}$

Массы байпасных устройств, корпуса ЛИА, корпуса ЛИАБ, а также электрохимической группы ЛИА определяются следующими функциями:

$$M_{\text{БП_АБ}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C) = \begin{cases} M_{\text{БП200}} \cdot N_{\text{ser}}, & |C \cdot N_{\text{par}} \geq 200 \\ M_{\text{БП100}} \cdot N_{\text{ser}}, & |200 > C \cdot N_{\text{par}} \geq 100 \\ M_{\text{БП50}} \cdot N_{\text{ser}}, & |100 > C \cdot N_{\text{par}} \end{cases} \quad (3.3)$$

$$M_{\text{АБ_Корп}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C) = \frac{N_{\text{par}} \cdot N_{\text{ser}} \cdot (M_{22\text{ЛИ85}} - 11 \cdot M_{\text{БП200}} - 22 \cdot M_{\text{ЛИГП85}})}{22 \cdot V_{\text{ЛИГП85}}}$$

$$\left(\left(\left(\frac{V_{\text{ЛИГП85}}^{\frac{1}{3}} - \Delta l_{\text{Корп_ЛИА}}}{C_{\text{ЛИГП85}}} \cdot C \right)^{\frac{1}{3}} + \Delta l_{\text{Корп_ЛИА}} \right)^3 \right) \quad (3.4)$$

$$M_{\text{АКК}_{\text{корп}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C) = M_{\text{корп}_{\text{ЛИА}_{\text{уд}}}} \cdot N_{\text{par}} \cdot N_{\text{ser}} \cdot \left(\left(C \cdot \frac{\left(V_{\text{ЛИГП85}}^{\frac{1}{3}} - \Delta l_{\text{корп}_{\text{ЛИА}}} \right)^{\frac{1}{3}}}{C_{\text{ЛИГП85}}} + \Delta l_{\text{корп}_{\text{ЛИА}}} \right)^3 - C \cdot \frac{\left(V_{\text{ЛИГП85}}^{\frac{1}{3}} - \Delta l_{\text{корп}_{\text{ЛИА}}} \right)^3}{C_{\text{ЛИГП85}}} \right) \quad (3.5)$$

$$M_{\text{АБ}_{\text{ЭХГ}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C) = \frac{N_{\text{par}} \cdot N_{\text{ser}} \cdot C}{C_{\text{ЛИГП85}}} \cdot \left(M_{\text{ЛИГП85}} - M_{\text{корп}_{\text{ЛИА}_{\text{уд}}}} \cdot \left(V_{\text{ЛИГП85}} - \left(V_{\text{ЛИГП85}}^{\frac{1}{3}} - \Delta l_{\text{корп}_{\text{ЛИА}}} \right)^3 \right) \right), \quad (3.6)$$

где $M_{\text{БП}_{\text{АБ}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C)$ – масса байпасных устройств, кг; $M_{\text{АБ}_{\text{корп}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C)$ – масса корпусных деталей ЛИАБ, кг; $M_{\text{АКК}_{\text{корп}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C)$ – масса корпусных деталей ЛИА, кг; $M_{\text{АБ}_{\text{ЭХГ}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C)$ – масса электрохимической группы ЛИАБ, кг; N_{par} – количество параллельно соединенных аккумуляторов в ЛИАБ, шт; N_{ser} – количество последовательно соединенных ЛИА или пакетов ЛИА в ЛИАБ, шт.; C – полная ёмкость ЛИАБ, А·ч.

Масса ЛИАБ в зависимости от её ёмкости и количества параллельно и последовательно соединенных аккумуляторов определяется выражением

$$M_{\text{АБ}}(C, N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}) = M_{\text{АБ}_{\text{корп}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C) + M_{\text{АКК}_{\text{корп}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C) + M_{\text{АБ}_{\text{ЭХГ}}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C), \quad (3.7)$$

где $M_{\text{АБ}}(N_{\text{par}}, N_{\text{ser}}, C)$ – масса ЛИАБ, кг.

Несмотря на то что максимальная ёмкость ЛИА разработки ПАО «Сатурн» составляет 120 А·ч [73], максимальная ёмкость ЛИА в штатных образцах ЛИАБ составляет 103 А·ч (для аккумулятора ЛИА-85 в составе ЛИАБ 2*22ЛИ-85). Поэтому при расчете массы ЛИАБ необходимо учитывать, что в случае превышения требуемой ёмкости ЛИАБ значения 103 А·ч ёмкость ЛИАБ должна набираться путем параллельного соединения аккумуляторов меньшей ёмкости.

Тогда масса ЛИАБ в зависимости от ёмкости ЛИА или пакета параллельно соединенных ЛИА и от количества последовательно соединенных ЛИА будет определяться выражением

$$M_{\text{АБ}}(N, C) = M_{\text{АБ}} \left(\left[\frac{C}{\frac{C \cdot N}{22 \cdot C_{\text{ЛИГП85}}}} \right], \left[\frac{C \cdot N}{22 \cdot C_{\text{ЛИГП85}}} \right], N \right), \quad (3.8)$$

где $M_{\text{АБ}}(N, C)$ – масса ЛИАБ, зависящая от ёмкости ЛИАБ и количества последовательно соединенных ЛИА (пакетов ЛИА), кг; N – количество последовательно соединенных ЛИА (пакетов ЛИА), шт.

Применение разработанной функции расчета массы ЛИАБ дает хорошую точность расчета. Так, масса ЛИАБ 23ЛИ-65 рассчитанная по формуле (3.8) составляет 45,14 кг. С учетом того, что конструкция ЛИАБ 23ЛИ-65 отличается от прототипа наличием плиты основания массой 1,8 кг, расчетное значение массы ЛИАБ 23ЛИ-65 по формуле (3.8) составит 46,94 кг при фактической массе ЛИАБ 46,8 кг [74]. Таким образом, ошибка расчета массы ЛИАБ составила менее 0,3 %.

Основной удельной характеристикой применяемых в составе СЭП геостационарных КА приборов контроля и защиты АБ (ПКЗ АБ) является удельная масса, т.е. масса прибора, приходящаяся на один канал измерения и управления.

Среди приборов отечественной разработки широко применяется в составе СЭП геостационарных КА прибор ПКЗ АБ-П разработки АО «НПЦ «Полюс» (г. Томск). Основные удельные характеристики данного прибора представлены в таблице 3.4. Прибор имеет блочную конструкцию и состоит из двух блоков. Первый блок (БЭ1) содержит элементы межблочного интерфейса (цепи электропитания и командно-информационные цепи), а также измерительные и управляющие каналы. Второй блок (БЭ2) совмещает в себе как измерительные и управляющие каналы, так и блок управления с интерфейсным блоком, реализующим мультиплексный канал обмена.

Таблица 3.4 – характеристики ПКЗ АБ-П

Параметр	Значение	Обозначение
Масса прибора, кг	10	$M_{\text{ПКЗ}}$
Масса БЭ1, кг	4	$M_{\text{БЭ1_ПКЗ}}$

Масса БЭ2, кг	6	$M_{\text{БЭ2_ПКЗ}}$
Количество каналов, шт	48	$N_{\text{К_ПКЗ}}$
Удельная масса прибора, кг/канал	0,208	$M_{\text{ПКЗ_УД}}$

Масса ПКЗ АБ с произвольным количеством каналов для СЭП, в составе которой используется комплект из двух ЛИАБ, может быть найдена с помощью следующего выражения:

$$M_{\text{ПКЗ}}(N) = M_{\text{БЭ2_ПКЗ}} - M_{\text{БЭ1_ПКЗ}} + \frac{M_{\text{БЭ1_ПКЗ}} \cdot 2}{N_{\text{К_ПКЗ}}} \cdot 2 \cdot N, \quad (3.9)$$

где $M_{\text{ПКЗ}}(N)$ – масса ПКЗ АБ, кг; N – количество последовательно соединенных ЛИА (пакетов ЛИА) в ЛИАБ.

В состав БС, применяемых в СЭП геостационарных КА, входят следующие основные компоненты:

- фотопреобразователи со встроенными шунтирующими диодами;
- развязывающие устройства;
- температурные датчики;
- внутренняя кабельная сеть;
- переходные элементы (кронштейны крепления соединителей и элементы крепления к каркасам развязывающих устройств, модулей и кабельной сети);
- выходные электрические соединители панелей;
- прочие элементы.

Оценочное распределение массы БС по основным элементам конструкции на примере для БС геостационарного КА приведено в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Оценочное распределение массы БС по элементам её конструкции

Наименования элемента БС	Масса, г/шт.	Количество, шт.	Масса, г
Фотопреобразователь	3,407	24310	82 823,1
Развязывающее устройство	8	210	1 680,0
Соединитель	150	22	3 300,0
Прочие элементы	-	-	27 196,9
СУММА			115 000

БС с параметрами по таблице 3.5 состоит из 10 панелей, в каждой из которых содержится по 41 элементарному генератору. Количество последовательно соединенных ФП в одном генераторе 59 и 60 шт.

Основные параметры, необходимые для расчета массы БС, приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Параметры расчета массы БС

Параметр	Значение	Обозначение
Масса одного ФП, кг	0,003407	$M_{\text{ФП}}$
Масса одного развязывающего устройства, кг	0,008	$M_{\text{ру_ФП}}$
Масса одного электрического соединителя (с элементами крепежа), кг	0,150	$M_{\text{Соед_БС}}$
Масса прочих элементов конструкции БС, отнесенная к количеству ФП в БС, кг	0.001119	$M_{\text{Констр_БС}}$

Масса БС с произвольным количеством последовательно и параллельно соединенных ФП определяется выражением (3.9):

$$M_{\text{БС}}(N_{\text{БС}_{\text{par}}}, N_{\text{БС}_{\text{ser}}}) = (M_{\text{ФП}} + M_{\text{Констр}_{\text{БС}}}) \cdot N_{\text{БС}_{\text{par}}} \cdot N_{\text{БС}_{\text{ser}}} + \\ + M_{\text{ру_ФП}} \cdot \left\lfloor \frac{N_{\text{БС}_{\text{par}}}}{2} \right\rfloor + \left\lfloor \frac{N_{\text{БС}_{\text{par}}}}{41} \cdot 2 + 2 \right\rfloor \cdot M_{\text{Соед_БС}}, \quad (3.10)$$

где $M_{\text{БС}}(N_{\text{БС}_{\text{par}}}, N_{\text{БС}_{\text{ser}}})$ – масса БС в зависимости от количества последовательно и параллельно соединенных ФП, кг; $N_{\text{БС}_{\text{par}}}$ – количество параллельно соединенных ФП в БС, шт.; $N_{\text{БС}_{\text{ser}}}$ – количество последовательно соединенных ФП в БС, шт.

На ранних стадиях проектирования СЭП геостационарных КА (например, на стадии разработки эскизного проекта) требования к массе ЭПА задаются по значению удельной мощности известного прототипа ЭПА с аналогичной архитектурой. В этом случае масса ЭПА проектируемой СЭП зависит от значения выходной мощности СЭП, выделяемой для полезной нагрузки.

Вместе с тем применение в составе СЭП ЭПА на базе мостовых квазирезонансных конвертеров позволяет варьировать параметрами силового

электрического интерфейса между БС и ЭПА, а также между АБ и ЭПА, не изменяя при этом значительно архитектуру самой ЭПА. Изменение параметров силового электрического интерфейса между составными частями СЭП приводит к изменению количественного состава силовых преобразовательных модулей в ЭПА, что в свою очередь приводит к изменению массы ЭПА.

Таким образом, в рассматриваемом процессе оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА с применением ЭПА на базе мостовых квазирезонансных конвертеров следует учитывать изменение массы ЭПА не только в результате изменения выходной мощности СЭП, но и в результате изменения межблочного силового электрического интерфейса СЭП.

Массы элементов ЭПА на базе мостовых квазирезонансных конвертеров, разрабатываемой АО «НПЦ «Полюс» по заказу АО «ИСС» [23, 24, 25, 75] и предназначенной для проведения автономных испытаний ЭПА, представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Массы элементов ЭПА

Параметр	Значение	Обозначение
Масса модуля стабилизации выходного напряжения 100 В, кг	2,578	$M_{МСН}$
Масса модуля разрядного устройства, кг	2,787	$M_{МРУ}$
Масса модуля зарядного устройства, кг	1,444	$M_{МЗУ}$
Масса регулятора напряжения БС (РНБС), кг	3,246	$M_{РНБС}$
Масса фильтра выходного напряжения ЭПА, кг	3,199	$M_{ФН100}$
Масса фильтра БС и АБ, кг	3,421	$M_{ФБСАБ}$
Масса устройств коммутации, контроля и управления (практически не зависит от выходной мощности ЭПА), кг	5,891	$M_{УК}$
Масса головной конструктивной сборки, кг	2,605	$M_{Констр_ЭПА}$

Рассмотрим в отдельности функции оценки массы составных частей ЭПА и далее функцию оценки массы ЭПА в целом. Для этого необходимо определить связь между функциональными параметрами элементов ЭПА и их массой, а также их требуемым количеством в составе ЭПА.

Рассматриваемые силовые преобразователи (МСН, МРУ), разработанные на базе мостовых квазирезонансных конвертеров, обеспечивают выходную мощность по шине 100 В на уровне 3 кВт.

Модуль разрядного устройства рассматриваемого прототипа ЭПА имеет характеристики, представленные в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Характеристики МРУ прототипа ЭПА

Параметр	Значение	Обозначение
Коэффициент передачи мощности, о.е.	0,947±0,006	$K_{\text{МРУ}}$
Собственное потребление, Вт	6,814±5,788	$P_{\text{МРУ_соб}}$
Минимальное рабочее напряжение АБ, В	67	$V_{\text{МРУ_АБ_min}}$
Максимальное рабочее напряжение АБ, В	94	$V_{\text{МРУ_АБ_max}}$
Выходная мощность модуля по шине 100 В, Вт	3000	$P_{\text{МРУ_max}}$

Выходная мощность рассматриваемого МРУ ограничена максимальным действующим значением входного тока при минимальном напряжении АБ по табл. 3.8. Поэтому, с учетом возможности повышения входного напряжения, функция расчета количества модулей (фаз) МРУ в составе ЭПА в зависимости от параметров силового электрического интерфейса между АБ и ЭПА имеет вид:

$$N_{\text{РУ_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_РУ}}) = \left\lceil \frac{I_{\text{Н_РУ}}}{\left(\frac{P_{\text{МРУ_max}}}{K_{\text{МРУ}} \cdot V_{\text{МРУ_АБ_min}} \cdot 2} \right)} \right\rceil; \quad (3.11)$$

$$N_{\text{РУ_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) = \left\lceil \frac{I_{\text{Н_РУ}}}{\left(\frac{\frac{P_{\text{МРУ_max}}}{V_{\text{МРУ_АБ_min}} \cdot 2} \cdot V_{\text{МРУ_АБ}}}{100} \right)} \right\rceil, \quad (3.12)$$

где $N_{\text{РУ_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_РУ}})$ – минимальное количество модулей МРУ; $V_{\text{МРУ_АБ}}$ – минимальное входное напряжение РУ со стороны АБ в процессе работы в режиме разряда, В; множитель «2» указывает на то, что МРУ выполнен в виде двух полукомплектов (фаз) силовых преобразователей разрядного устройства с

выходной мощностью 1 500 Вт каждый; $N_{\text{РУ_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}})$ – количество модулей МРУ в зависимости от минимального входного напряжения РУ.

Тогда количество модулей МРУ будет определяться выражением

$$N_{\text{РУ_ЭПА}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) = \begin{cases} N_{\text{РУ_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) & | N_{\text{РУ_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) > N_{\text{РУ_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_РУ}}) \\ N_{\text{РУ_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_РУ}}) & | N_{\text{РУ_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) \leq N_{\text{РУ_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_РУ}}) \end{cases}, \quad (3.13)$$

где $N_{\text{РУ_ЭПА}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}})$ – количество модулей МРУ.

Тогда функция массы МРУ в составе ЭПА будет иметь следующий вид:

$$M_{\text{РУ_ЭПА}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) = \begin{cases} N_{\text{РУ_ЭПА}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) \cdot \frac{M_{\text{МРУ}}}{2} & | V_{\text{МРУ_АБ}} < 104 \\ N_{\text{РУ_ЭПА}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) \cdot \frac{M_{\text{МСН}}}{2} & | V_{\text{МРУ_АБ}} > 104 \end{cases}, \quad (3.14)$$

где $M_{\text{РУ_ЭПА}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ_min}})$ – суммарная масса модулей разрядных устройств ЭПА, кг.

Изменение суммарной массы МРУ ЭПА в зависимости от минимального значения входного напряжения РУ в режиме разряда при мощности нагрузки 12 кВт представлено на рисунке 3.1.

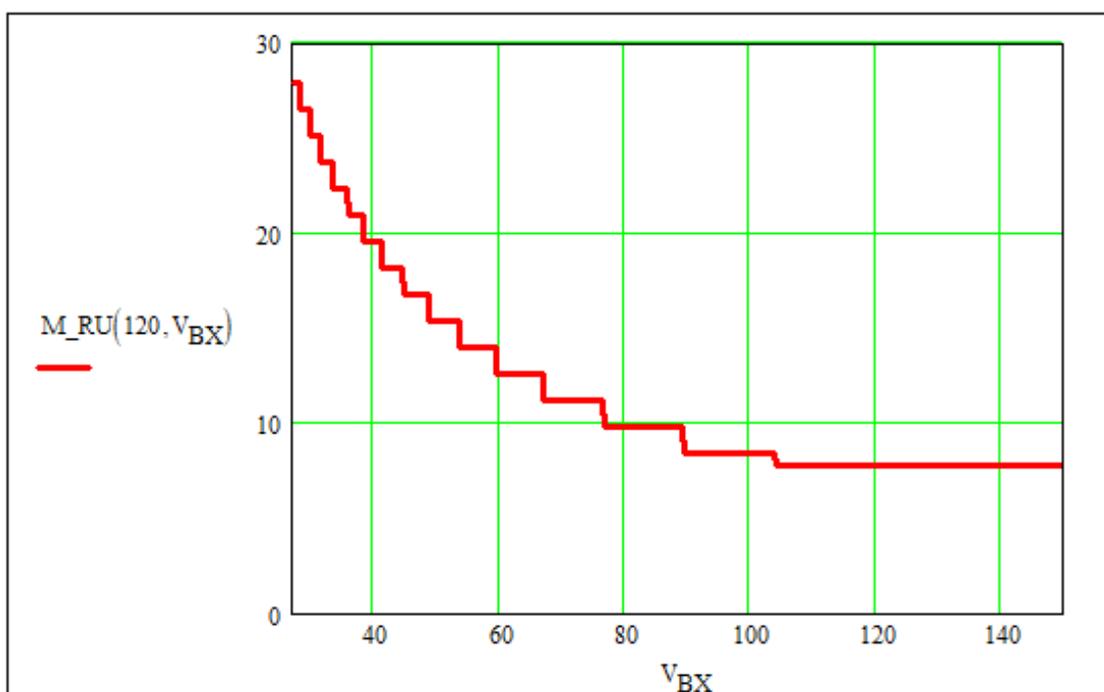


Рисунок 3.1 – Изменение суммарной массы МРУ ЭПА при изменении входного напряжения

Модуль разрядного устройства может быть также применен в качестве модуля стабилизатора напряжения БС (МСН) в случае, если минимальное рабочее напряжение БС не превышает значение, при котором силовой модуль работает только в понижающем режиме (104 В для рассматриваемых модулей). В случае если минимальное рабочее напряжение БС позволяет силовому модулю работать только в понижающем режиме, то возможно применение модуля МСН. При этом следует учитывать, что в случае, если максимальное значение напряжения холостого хода БС превышает 160 В, то требуется вводить в состав ЭПА РНБС для защиты транзисторов ЭПА от перенапряжения с учетом применяемых коэффициентов запаса. Характеристики МСН приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Характеристики МСН прототипа ЭПА

Параметр	Значение	Обозначение
Коэффициент передачи мощности, о.е.	0,958±0,006	$K_{МСН}$
Собственное потребление, Вт	2,4±5,6	$P_{МСН_соб}$
Минимальное рабочее напряжение БС, В	102,4	$V_{МСН_БС_min}$
Максимальное рабочее напряжение БС, В	160	$V_{МСН_БС_max}$
Выходная мощность модуля по шине 100 В, Вт	3000	$P_{МСН_max}$

Тогда функции для расчета количества модулей и массы МСН в составе ЭПА будут иметь следующий вид:

$$N_{МСН_ЭПА_min}(I_{Н_СН}) = \left\lceil \frac{I_{Н_СН}}{\left(\frac{P_{МСН_max}}{K_{МСН} \cdot V_{МСН_БС_min} \cdot 2} \right)} \right\rceil; \quad (3.15)$$

$$N_{МСН_ЭПА_вх}(I_{Н_СН}, V_{МСН_БС}) = \left\lceil \frac{I_{Н_СН}}{\left(\frac{P_{МСН_max}}{\frac{V_{МСН_БС_min} \cdot 2 \cdot V_{МСН_БС}}{100}} \right)} \right\rceil; \quad (3.16)$$

$$N_{\text{СН_ЭПА}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}}) = \begin{cases} N_{\text{СН_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}}) & | N_{\text{СН_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}}) > N_{\text{СН_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_СН}}); \\ N_{\text{СН_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_СН}}) & | N_{\text{СН_ЭПА_ВХ}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}}) \leq N_{\text{СН_ЭПА_min}}(I_{\text{Н_СН}}) \end{cases}; \quad (3.17)$$

$$M_{\text{СН_ЭПА}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}}) = \begin{cases} N_{\text{СН_ЭПА}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}}) \cdot \frac{M_{\text{МРУ}}}{2} & |_{V_{\text{МСН_БС}} < 104} \\ N_{\text{СН_ЭПА}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}}) \cdot \frac{M_{\text{МСН}}}{2} & |_{V_{\text{МСН_БС}} > 104} \end{cases}, \quad (3.18)$$

где $M_{\text{СН_ЭПА}}(I_{\text{Н_СН}}, V_{\text{МСН_БС}})$ – суммарная масса модулей СН в составе ЭПА, кг;
 $I_{\text{Н_СН}}$ – выходной ток ЭПА в режиме СН, А; $V_{\text{МСН_БС}}$ – минимальное входное напряжение СН в процессе функционирования ЭПА в режиме СН, В.

Модуль РНБС прототипа ЭПА с характеристиками, соответствующими данным таблицы 3.6, обеспечивает регулирование (ограничение) напряжений 32 секций БС. Максимальный ток каждой из 32 секций БС составляет 7,4 А. Тогда выражение для массы РНБС будет иметь следующий вид:

$$M_{\text{РНБС}}(I_{\text{БС_КЗ}}) = \left\lceil \frac{I_{\text{БС_КЗ}}}{7,4} \right\rceil \cdot \frac{M_{\text{РНБС}}}{32}, \quad (3.19)$$

где $M_{\text{РНБС}}(I_{\text{БС_КЗ}})$ – масса модуля РНБС, кг; $I_{\text{БС_КЗ}}$ – ток короткого замыкания БС, А.

Модуль зарядного устройства прототипа ЭПА имеет характеристики, приведенные в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Характеристики МЗУ прототипа ЭПА

Параметр	Значение	Обозначение
Коэффициент передачи мощности, о.е.	0,967±0,003	$K_{\text{МЗУ}}$
Собственное потребление, Вт	2,4±5,6	$P_{\text{МЗУ_соб}}$
Максимальное значение тока заряда АБ, А	15±2	$I_{\text{МЗУ_max}}$
Минимальное рабочее напряжение АБ, В	65,8	$V_{\text{МСН_БС_min}}$
Максимальное рабочее напряжение АБ, В	92,8	$V_{\text{МСН_БС_max}}$
Выходная мощность модуля 100 В, Вт	1577,6	$P_{\text{МЗУ_max}}$

Выражение для массы МЗУ в составе ЭПА будет иметь вид:

$$M_{\text{МЗУ}}(I_{\text{ЗАР_max}}, V_{\text{ЗАР_max}}) = \left[\frac{I_{\text{ЗАР_max}} \cdot V_{\text{ЗАР_max}}}{P_{\text{МЗУ_max}}} \right] \cdot M_{\text{МЗУ}}, \quad (3.20)$$

где $M_{\text{МЗУ}}(I_{\text{ЗАР_max}}, V_{\text{ЗАР_max}})$ – масса комплекта МЗУ, кг; $I_{\text{ЗАР_max}}$ – максимальное значение тока заряда, А; $V_{\text{ЗАР_max}}$ – максимальное значение напряжения заряда, В.

Масса фильтра выходного напряжения, а также массы фильтров БС и АБ могут быть найдены из выражений:

$$M_{\text{ФН100}}(I_{\text{Н_max}}) = \frac{I_{\text{Н_max}}}{110} \cdot M_{\text{ФН100}}; \quad (3.21)$$

$$M_{\text{ФБСАБ}}(I_{\text{РУ_ВХ_МАХ}}) = \frac{I_{\text{РУ_ВХ_МАХ}} \cdot V_{\text{МРУ_АБ_min}}}{P_{\text{МРУ_max}}} \cdot M_{\text{ФБСАБ}}, \quad (3.22)$$

где $M_{\text{ФН100}}(I_{\text{Н_max}})$ – масса выходного фильтра, кг; $I_{\text{Н_max}}$ – максимальное значение тока нагрузки, А; $M_{\text{ФБСАБ}}(I_{\text{РУ_ВХ_МАХ}})$ – масса фильтра БС и АБ, кг; $I_{\text{РУ_ВХ_МАХ}}$ – максимальное значение тока разряда АБ, А.

Масса головной сборки зависит от массы модулей в составе ЭПА, поэтому массу головной сборки можно определить исходя из следующего выражения:

$$M_{\text{Констр_ЭПА}} = K_{\text{Констр_ЭПА}} \cdot \left(\begin{array}{l} M_{\text{ФБСАБ}}(I_{\text{РУ_ВХ_МАХ}}) + \\ M_{\text{ФН100}}(I_{\text{Н_max}}) + \\ M_{\text{МЗУ}}(I_{\text{ЗАР_max}}, V_{\text{ЗАР_max}}) + \\ M_{\text{РНБС}}(I_{\text{БСКЗ}}) + \\ M_{\text{СНЭПА}}(I_{\text{НСН}}, V_{\text{МСНБС}}) + \\ M_{\text{РУ_ЭПА}}(I_{\text{Н_РУ}}, V_{\text{МРУ_АБ}}) \end{array} \right), \quad (3.23)$$

где $M_{\text{Констр_ЭПА}}$ – масса конструкции ЭПА, кг; $K_{\text{Констр_ЭПА}}$ – коэффициент, численно равный отношению массы конструкции к массе ЭПА прототипа, кг.

Таким образом, используя выражения (3.11-3.23), можно найти массу ЭПА с произвольными относительно исходной ЭПА параметрами электрического интерфейса с АБ и БС.

3.2 Оптимизация энергомассовых характеристик системы БС-БКС БС

В рамках оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА целесообразно рассмотреть БС и БКС БС как самостоятельные объекты для оптимизации их энергомассовых характеристик. Для этого необходимо рассмотреть БС и БКС БС в качестве системы, которая характеризуется некоторой выходной мощностью и массой.

Пусть, например, дана некоторая система, состоящая из БС и БКС БС, такая, что в составе БС имеется $N_{БС_{par}}$ параллельно соединенных ФП и $N_{БС_{ser}}$ последовательно соединенных ФП, а в составе БКС БС имеется n параллельно соединенных проводов с длиной $L_{БКС_{БС}}$. Масса БС определяется согласно выражению (3.10), а масса БКС БС - согласно выражению (3.1). При некоторой заданной требуемой выходной мощности системы $P_{БС_{БКС}}$ зависимость количества последовательно соединенных ФП в БС от количества проводов в БКС БС, с учетом выражения (3.1), будет иметь вид:

$$N_{БС_{ser}}(n) = \left[\frac{P_{БС_{БКС}} + \frac{L_{БКС_{БС}} \cdot R_{уд.0.2} \cdot K_{БКС.1} \cdot K_{БКС.2} \cdot 10^{-3}}{n} \cdot (N_{БС_{par}} \cdot V_{ФП_{опт}})^2}{V_{ФП_{опт}} \cdot I_{ФП_{опт}} \cdot N_{БС_{par}}} \right], \quad (3.24)$$

где $N_{БС_{ser}}(n)$ – количество последовательно соединенных ФП в БС, шт; $V_{ФП_{опт}}$ – напряжение ФП в точке максимальной мощности, В; $I_{ФП_{опт}}$ – ток одного ФП в точке максимальной мощности, А.

Подставляя выражение (3.24) в выражение (3.10) получим выражение для массы БС в зависимости от количества проводов в БКС БС при заданных мощности и напряжении на выходе системы БС – БКС БС:

$$M_{БС}(n) = (M_{ФП} + M_{КонстрБС}) \cdot N_{БС_{par}} \cdot N_{БС_{ser}}(n) + M_{руФП} \cdot \frac{N_{БС_{par}}}{2} + \left(\frac{N_{БС_{par}}}{41} \cdot 2 + 2 \right) \cdot M_{Соед_{БС}}. \quad (3.25)$$

Тогда масса всей системы будет определяться выражением (3.26):

$$M_{БС-БКС_{БС}}(n) = M_{БС}(n) + M_{БКС_{БС}}(n), \quad (3.26)$$

где $M_{БС-БКС_{БС}}(n)$ – масса системы БС – БКС БС, кг.

Данное выражение можно преобразовать к виду

$$M_{\text{БС-БКС БС}}(n) = a + \frac{b}{n} + c \cdot n, \quad (3.27)$$

где a, b, c – некоторые константы, значения которых зависят от характеристик БС и БКС БС.

График выражения (3.27) для выходной мощности системы 12 кВт представлен на рисунке 3.2. На рисунке 3.2 видно, что при $n > 0$ график имеет единственный экстремум, соответствующий минимальной массе системы БС – БКС БС при заданных параметрах выходной мощности. Действительно, при увеличении количества проводов в БКС масса БКС стремится к бесконечности, в то время как при уменьшении количества проводов в БКС к бесконечности стремится масса БС из-за роста требуемого количества последовательно соединенных ФП для компенсации падения напряжения на БКС. Точное значение требуемого количества проводов в БКС БС, удовлетворяющего критерию минимума массы рассматриваемой системы БС – БКС БС, можно найти, приравняв дифференциал выражения (3.26) по n к нулю и решая получившееся уравнение относительно n . Решение данного уравнения для выходной мощности 12 кВт отмечено на рисунке 3.2 точкой и составляет 52 провода сечением $0,2 \text{ мм}^2$ (значение количества проводов округлено сверху до ближайшего целого).

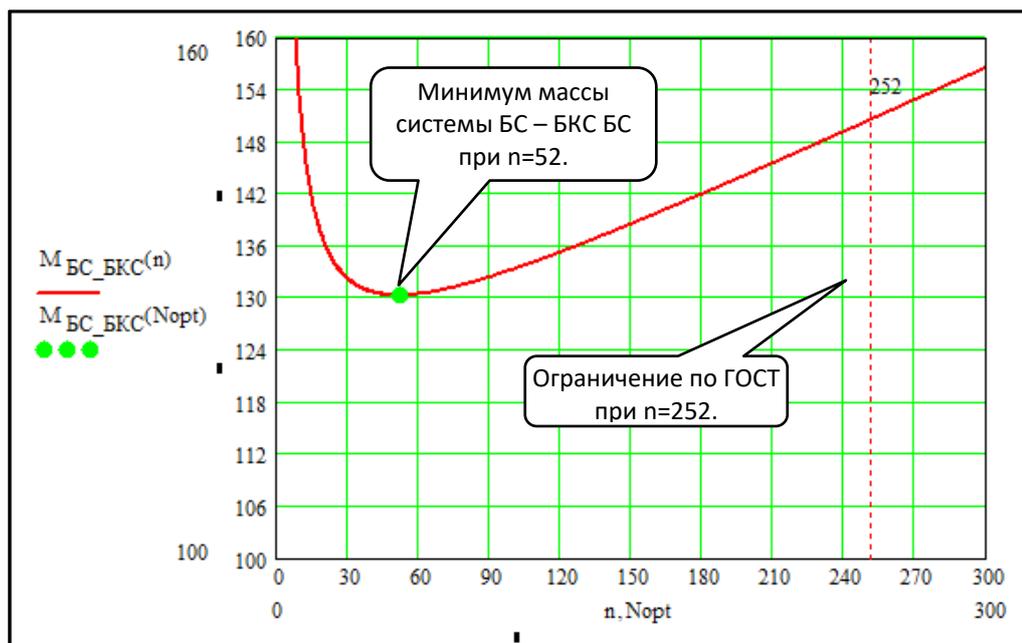


Рисунок 3.2 – График массы системы БС – БКС БС

Указанная методика оптимизации энергомассовых характеристик системы БС – БКС БС при заданном значении выходной мощности использует в качестве независимой переменной количество проводов в БКС БС. Вместе с тем в ходе оптимизации энергомассовых характеристик СЭП в качестве независимых переменных используется количество последовательно и параллельно соединенных ФП в БС. Поэтому для того чтобы для каждой реализации БС с заданным количеством последовательно и параллельно соединенных ФП энергомассовые характеристики системы БС – БКС БС были оптимальными, следует найти зависимость количества проводов в БКС БС от количества параллельно и последовательно соединенных ФП в БС. Для этого необходимо решить уравнение:

$$\frac{d \frac{P_{\text{вых}}(n)}{M_{\text{БС}}(N_{\text{БС}_{\text{par}}}, N_{\text{БС}_{\text{ser}}}) + M_{\text{БКС_БС}}(n)}{dn} = 0, \quad (3.28)$$

где $P_{\text{вых}}(n)$ – выходная мощность системы БС – БКС БС, Вт, определяемая в соответствии с выражением (3.29).

$$P_{\text{вых}}(n) = N_{\text{БС}_{\text{par}}} \cdot N_{\text{БС}_{\text{ser}}} \cdot V_{\text{ФП_опт}} \cdot I_{\text{ФП_опт}} - \left(I_{\text{ФП_опт}} \cdot N_{\text{БС}_{\text{par}}} \right)^2 \cdot \frac{L_{\text{БКС_БС}} \cdot R_{\text{уд.0.2}} \cdot 10^{-3} \cdot K_{\text{БКС_1}} \cdot K_{\text{БКС_2}}}{n} \quad (3.29)$$

Решение этого уравнения относительно количества проводов в БКС БС имеет следующий вид:

$$n(N_{\text{БС}_{\text{par}}}, N_{\text{БС}_{\text{ser}}}) = \left[\frac{B \cdot C + \sqrt{B \cdot C \cdot (B \cdot C + A \cdot M_{\text{БС}}(N_{\text{БС}_{\text{par}}}, N_{\text{БС}_{\text{ser}}}))}}{C \cdot A} \right], \quad (3.30)$$

где A , B , C – константы для каждой реализации БС, определяемые выражениями (3.31, 3.32, 3.33), а $M_{\text{БС}}(N_{\text{БС}_{\text{par}}}, N_{\text{БС}_{\text{ser}}})$ – выражение для массы БС в соответствии с (3.10).

$$A = N_{\text{БС}_{\text{par}}} \cdot N_{\text{БС}_{\text{ser}}} \cdot I_{\text{ФП_опт}} \cdot V_{\text{ФП_опт}}; \quad (3.31)$$

$$B = \left(N_{\text{БС}_{par}} \cdot I_{\text{ФП_опт}} \right)^2 \cdot L_{\text{БКС_БС}} \cdot R_{\text{уд}_{0.2}} \cdot 10^{-3} \cdot K_{\text{БКС_1}} \cdot K_{\text{БКС_2}}; \quad (3.32)$$

$$C = L_{\text{БКС_БС}} \cdot M_{\text{уд}_{0.2}} \cdot 10^{-3} \cdot K_{\text{БКС_3}}. \quad (3.33)$$

Применение формулы (3.30) для расчета количества проводов БКС БС, соответствующего оптимуму энергомассовых характеристик системы БС – БКС БС, возможно лишь в случае, если найденное количество проводов удовлетворяет требованиям ГОСТ В 23584 по токовой нагрузке проводов. Количество проводов в БКС БС, удовлетворяющее требованиям ГОСТ В 23584, определяется выражением (3.34):

$$n(N_{\text{БС}_{par}}) = \left\lfloor \frac{I_{\text{ФП_опт}} \cdot N_{\text{БС}_{par}}}{4 \cdot S_{0.2}} \right\rfloor. \quad (3.34)$$

Оценка возможности применения выражения (3.30) для нахождения количества проводов в БКС БС, соответствующего оптимальному значению энергомассовых характеристик системы БС – БКС БС, может быть проведена путем сравнительного анализа выражений для удельной мощности рассматриваемой системы. Выражение для удельной мощности системы БС – БКС БС имеет следующий вид:

$$P_{\text{уд}}(N_{\text{БС}_{par}}, N_{\text{БС}_{ser}}) = \frac{P_{\text{вых}}(n)}{M_{\text{БС}}(N_{\text{БС}_{par}}, N_{\text{БС}_{ser}}) + M_{\text{БКС_БС}}(n)}, \quad (3.35)$$

где $P_{\text{уд}}(N_{\text{БС}_{par}}, N_{\text{БС}_{ser}})$ – удельная мощность системы БС – БКС БС, Вт/кг.

Подставив в выражение (3.35) в качестве n выражения (3.30) и (3.34), можно получить зависимость удельной мощности системы БС – БКС БС для случая с количеством проводов, которое соответствует оптимальному решению, и количеством проводов, которое удовлетворяет требованиям ГОСТ В 23584. Графики поверхностей удельной мощности системы БС – БКС БС в рассматриваемых случаях приведены на рисунке 3.3.

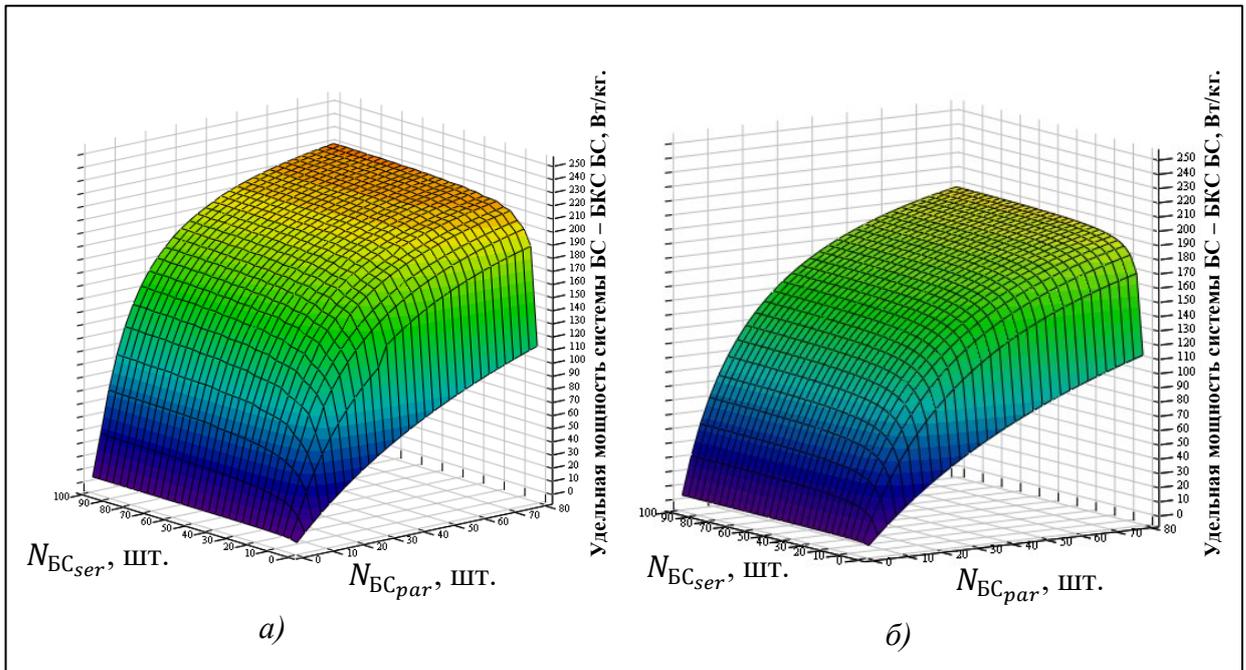


Рисунок 3.3 – График удельной мощности системы БС – БКС БС в зависимости от количества последовательно и параллельно соединенных ФП в БС

На рисунке 3.3, *а)* приведен график удельной мощности рассматриваемой системы с использованием выражения (3.30), а на рисунке 3.3, *б)* – с использованием выражения (3.34). Видно, что графики имеют похожий характер, а удельная мощность системы БС – БКС БС растет с ростом количества последовательно соединенных в БС ФП за счет снижения доли массы БКС БС. Предел функции (3.35) при $N_{BC_{par}}$ и $N_{BC_{ser}}$ стремящихся к бесконечности, стремится к некоторому значению удельной мощности системы БС – БКС БС, которое определяется параметрами ФП (в рассматриваемом случае около 250 Вт/кг).

Применение для расчета требуемого количества проводов в БКС БС выражения (3.30) возможно только в случае, если удельная мощность системы, где для n используется формула (3.34), больше либо равна удельной мощности системы, где для n используется формула (3.30) при одних и тех же значениях $N_{BC_{par}}$ и $N_{BC_{ser}}$. График разности выражения (3.35), где для n используется формула (3.34), и выражения (3.35), где для n используется формула (3.30), приведен на рисунке 3.4.

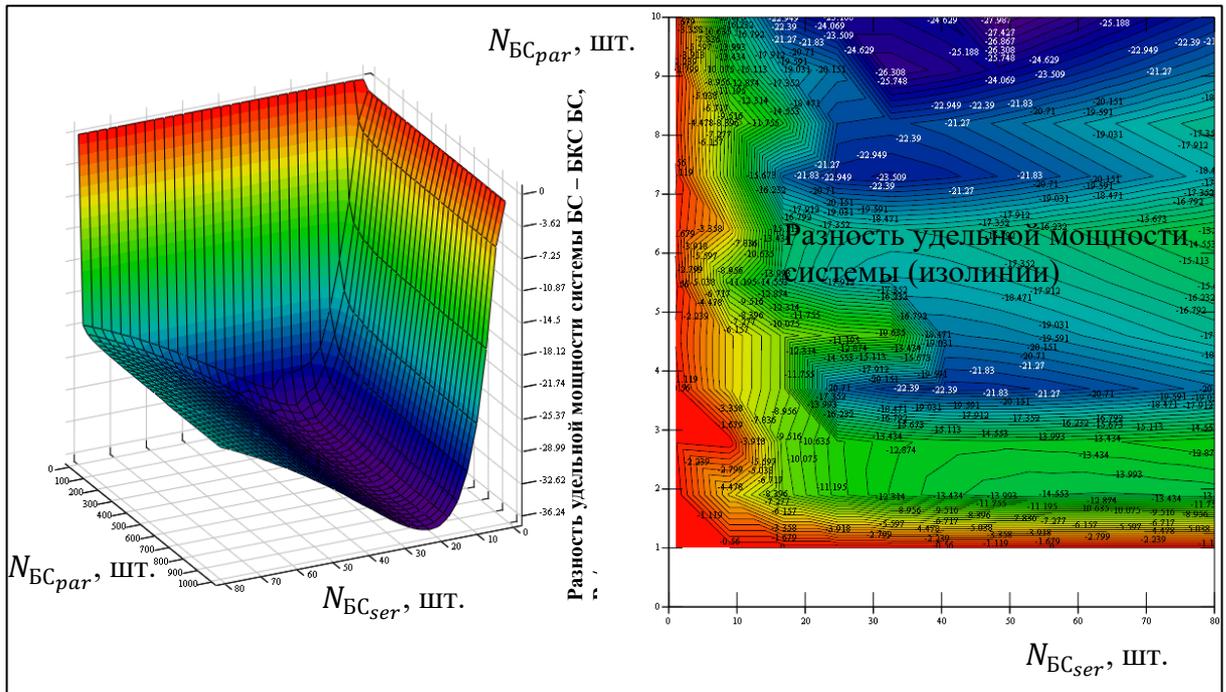


Рисунок 3.4 – Разность удельных мощностей системы БС – БКС БС для количества проводов в БКС БС по формулам (3.30) и (3.34)

Функция, график которой представлен на рисунке 3.4, обращается в ноль при $N_{БС_{ser}}$ стремящемся к бесконечности, что обусловлено тем, что функции, которые представлены на графиках рисунка 3.3, а) и 3.3, б) имеют один и тот же предел при $N_{БС_{ser}}$, стремящемся к бесконечности. Функция, график которой представлен на рисунке 3.4, также обращается в ноль при малых $N_{БС_{par}}$ и $N_{БС_{ser}}$ (меньше 5). Это обусловлено тем, что при малых значениях $N_{БС_{par}}$ и $N_{БС_{ser}}$ разность количества проводов в БКС БС, вычисляемого по формулам (3.30) и (3.34), оказывается меньше единицы, что при округлении сверху до ближайшего целого дает идентичный результат.

Таким образом, поскольку малые (меньше 5) и бесконечно большие значения $N_{БС_{par}}$ и $N_{БС_{ser}}$ не входят в область допустимых значений для БС геостационарных КА, использование формулы (3.30) для расчета количества проводов БКС БС невозможно как не удовлетворяющее требованиям ГОСТ В 23584 по токовой загрузке проводов. Поэтому при расчете параметров БКС БС требуемое количество проводов следует находить в соответствии с выражением (3.34).

Проведенный анализ дает основания полагать, что с увеличением количества последовательно соединенных в БС ФП удельная мощность системы БС – БКС БС будет монотонно возрастать, и поэтому для достижения максимальной эффективности данной системы необходимо применять максимально возможное из области допустимых значений количество последовательно соединенных ФП в БС. Вместе с тем следует учитывать, что для некоторой требуемой выходной мощности системы БС – БКС БС изменение количества последовательно соединенных в БС ФП приведет к появлению избыточного относительно требуемого количества ФП в БС. Появление избыточного числа ФП обусловлено тем, что при заданном количестве последовательно соединенных ФП количество параллельно соединенных ФП (элементарных генераторов) не всегда оказывается целым и тогда округляется сверху до ближайшего целого. Поэтому наряду с сохранением общей тенденции к повышению удельной мощности и снижению массы системы БС – БКС БС с ростом количества последовательно соединенных в БС ФП будут наблюдаться локальные минимумы массы для одной и той же требуемой выходной мощности системы. Появление локальных минимумов массы системы БС – БКС БС выходной мощностью 6.6 кВт при изменении количества последовательно соединенных ФП в БС продемонстрировано на рисунке 3.5.

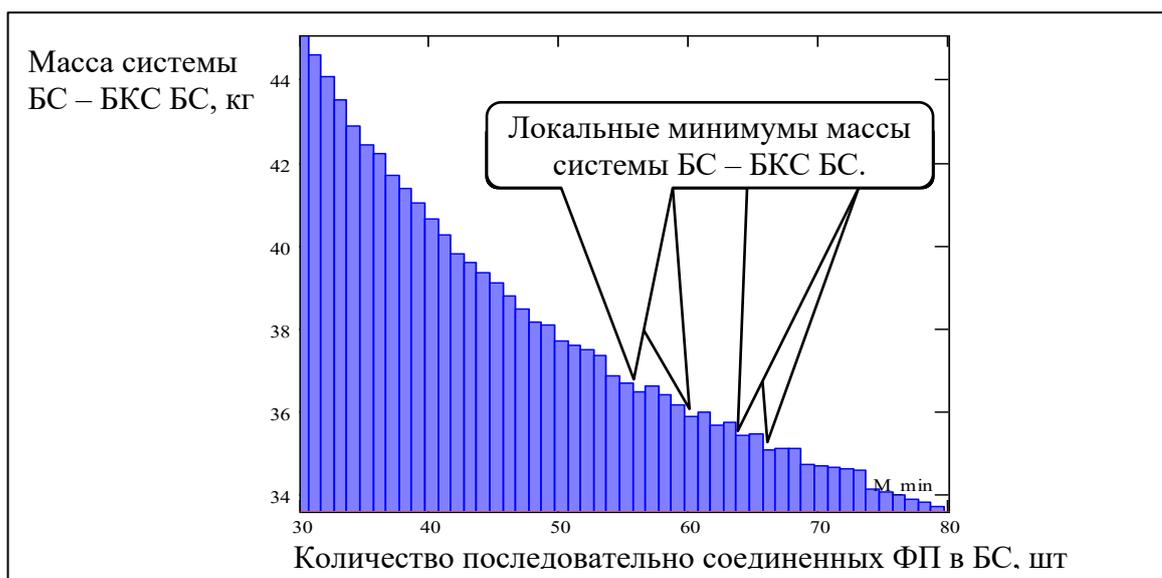


Рисунок 3.5 – Локальные минимумы массы системы БС – БКС БС при заданной выходной мощности и изменении количества последовательно соединенных в БС ФП

Таким образом, при увеличении количества последовательно соединенных ФП в БС будет наблюдаться рост удельной мощности и снижение массы системы БС – БКС БС с появлением локальных минимумов массы для заданной требуемой выходной мощности системы.

3.3 Оптимизация энергомассовых характеристик системы АБ - БКС АБ

Аналогично системе БС – БКС БС возможно осуществить оптимизацию энергомассовых характеристик системы АБ – БКС АБ. Для этого необходимо рассмотреть данную систему при условии, что параметры АБ (энергоёмкость, ёмкость, количество последовательно соединенных аккумуляторов и т.д.) являются постоянными, а количество проводов заданного сечения БКС АБ изменяется в некоторых пределах. Для примера рассмотрим АБ в конфигурации 2×22ЛИИ-85, которая описана в главе 2 и параграфе 3.1.2.

Максимальные энергомассовые характеристики рассматриваемой системы будут достигаться при количестве проводов, найденном из следующего уравнения:

$$\frac{d}{dn} E_{\text{АБ_БКС_уд}}(n) = 0, \quad (3.36)$$

где $E_{\text{АБ_БКС_уд}}(n)$ – удельная энергия системы АБ – БКС АБ при прохождении КА ТУЗ максимальной длительности, Вт/кг; n – количество проводов заданной площади поперечного сечения в зарядно-разрядной цепи АБ, шт.

Удельная энергия рассматриваемой системы при условии постоянства характеристик АБ может быть найдена с помощью выражения (3.37):

$$E_{\text{АБ_БКС_уд}}(n) = \frac{C \cdot N \cdot V_{\text{Акк_ср}} \cdot DoD - I_{\text{АБ_разр_max}}^2 \frac{R_{\text{уд.0.2}} \cdot K_{\text{БКС_1}} \cdot K_{\text{БКС_2}} \cdot L_{\text{БКС_АБ}} \cdot 10^{-3}}{n} \cdot T_{\text{ТУЗ}}}{M_{\text{АБ}}(N, C) + 2 \cdot M_{\text{БКС_АБ}}(n)}, \quad (3.37)$$

где $V_{\text{Акк_ср}}$ – среднее напряжение аккумулятора на разряде (3.8 В), В; C – ёмкость пакета из двух аккумуляторов ЛИГП-85 (206 А*ч), А*ч; N – количество последовательно соединенных пакетов аккумуляторов (22 шт.), шт.; DoD – допустимая глубина разряда АБ, 0.7, о.е.; $I_{\text{АБ_разр_max}}$ – максимально допустимый ток разряда АБ (определяется как $\frac{C}{2}$ для АБ, функционирующих на ГСО), А; $T_{\text{ТУЗ}}$ – максимальная длительность теневого участка Земли (1.2 ч), ч; $M_{\text{АБ}}(N, C)$ – масса АБ в соответствии с формулой (3.8), кг; $2 \cdot M_{\text{БКС_АБ}}(n)$ – удвоенная масса БКС АБ (учитываются прямая и обратная цепи) в соответствии с формулой (3.2), кг.

График функции (3.37) с параметрами АБ в конфигурации 2×22ЛИ-85 представлен на рисунке 3.6.

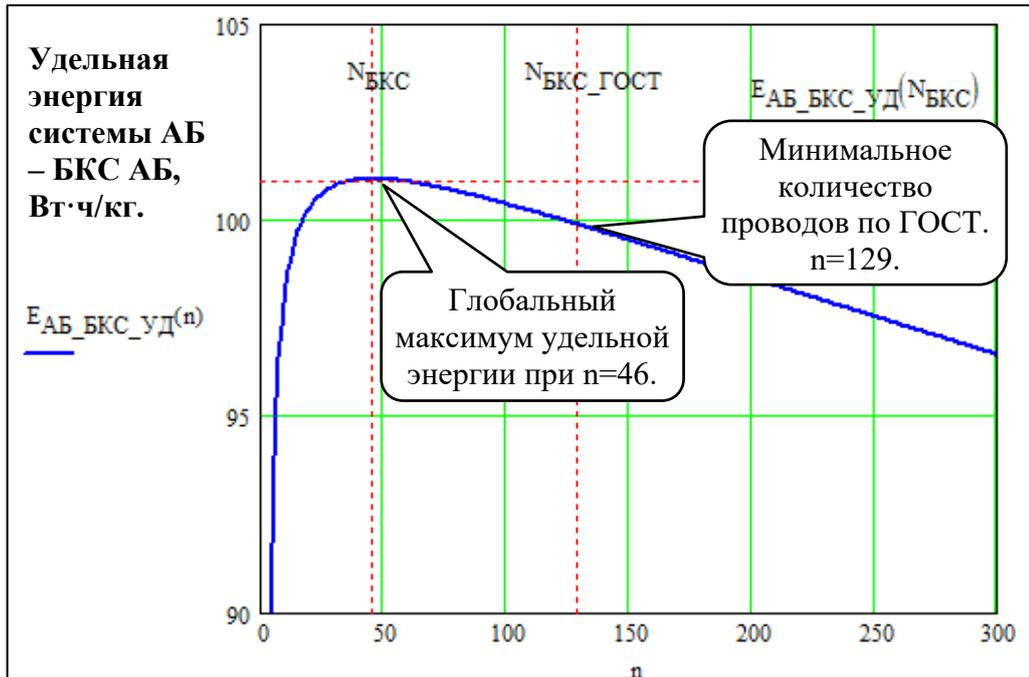


Рисунок 3.6 – График функции (3.36)

На графике видно, что отношение энергии рассматриваемой системы к ее массе имеет экстремум, соответствующий максимуму энергомассовых характеристик. Значения $N_{\text{БКС}}$ и $E_{\text{АБ_БКС_уд}}(N_{\text{БКС}})$ определяют требуемое количество проводов с площадью поперечного сечения $0,2 \text{ мм}^2$ и максимальную удельную энергию системы соответственно. Значение $N_{\text{БКС}}$ найдено как положительный корень уравнения (3.37) и составляет 46 проводов.

Анализ уравнения (3.37) показывает, что количество проводов для оптимального значения удельной энергии системы АБ – БКС АБ всегда будет не удовлетворять требованиям ГОСТ В 23584 по токовой нагрузке проводов. Так, для рассматриваемого случая требуемое по ГОСТ В 23584 количество проводов составляет 129 шт. при токовой нагрузке БКС АБ не более 4 А/мм^2 . Поэтому уравнение (3.37) с учетом требований ГОСТ В 23584 следует записать в виде

$$\begin{aligned}
 E_{\text{АБ_БКС_уд}}(N, C) &= \\
 &= \frac{C \cdot N \cdot V_{\text{Акк_ср}} \cdot DoD - \left(\frac{C}{2}\right)^2 \frac{R_{\text{уд.0.2}} \cdot K_{\text{БКС.1}} \cdot K_{\text{БКС.2}} \cdot L_{\text{БКС.АБ}} \cdot 10^{-3}}{\left[\frac{C}{2 \cdot 4 \cdot S_{0.2}}\right]} \cdot T_{\text{ТУЗ}}}{M_{\text{АБ}}(N, C) + 2 \cdot L_{\text{БКС.АБ}} \cdot 10^{-3} \cdot M_{\text{уд.0.2}} \cdot K_{\text{БКС.3}} \cdot \left[\frac{C}{2 \cdot 4 \cdot S_{0.2}}\right]} \quad (3.38)
 \end{aligned}$$

При этом с учетом требований ГОСТ В 23584 количество проводов в БКС АБ с площадью поперечного сечения 0,2 мм² будет определяться следующим выражением

$$n(C) = \left\lceil \frac{C}{2 \cdot 4 \cdot S_{0.2}} \right\rceil, \quad (3.39)$$

где $n(C)$ – требуемое количество проводов, шт., которое необходимо использовать для расчета массы БКС АБ по формуле (3.2).

Если в уравнении (3.38) зафиксировать энергоемкость АБ в соответствии с характеристиками АБ в конфигурации 2×22ЛИ-85, но при этом варьировать количеством последовательно соединенных аккумуляторов, то получится выражение (3.40):

$$\begin{aligned}
 E_{\text{АБ_БКС_уд}}(N) &= \\
 &= \frac{C_{\text{ЛИГП85}} \cdot \frac{22}{N} \cdot N \cdot V_{\text{Акк_ср}} \cdot DoD - \left(\frac{C_{\text{ЛИГП85}} \cdot \frac{22}{N}}{2}\right)^2 \frac{R_{\text{уд.0.2}} \cdot K_{\text{БКС.1}} \cdot K_{\text{БКС.2}} \cdot L_{\text{БКС.АБ}} \cdot 10^{-3}}{\left[\frac{C_{\text{ЛИГП85}} \cdot \frac{22}{N}}{2 \cdot 4 \cdot S_{0.2}}\right]} \cdot T_{\text{ТУЗ}}}{M_{\text{АБ}}\left(N, C_{\text{ЛИГП85}} \cdot \frac{22}{N}\right) + 2 \cdot L_{\text{БКС.АБ}} \cdot 10^{-3} \cdot M_{\text{уд.0.2}} \cdot K_{\text{БКС.3}} \cdot \left[\frac{C_{\text{ЛИГП85}} \cdot \frac{22}{N}}{2 \cdot 4 \cdot S_{0.2}}\right]} \quad (3.40)
 \end{aligned}$$

Выражение (3.40) отображает значения удельной энергоемкости системы АБ – БКС АБ при постоянной энергоемкости АБ, соответствующей энергоемкости АБ в конфигурации 2×22ЛИ-85, в зависимости от количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ. График выражения (3.40) представлен на рисунке 3.7.

На рисунке 3.7 видно, что график функции (3.40) имеет два экстремума (глобальный и локальный), соответствующие максимальному значению удельной

энергии системы АБ – БКС АБ в рассматриваемом диапазоне последовательно соединенных аккумуляторов в АБ. Скачкообразные изменения графика на рис. 3.7 соответствуют изменению типа применяемого в АБ байпасного переключателя соответствующей массы при изменении количества последовательно соединенных аккумуляторов (пакетов аккумуляторов) в АБ.

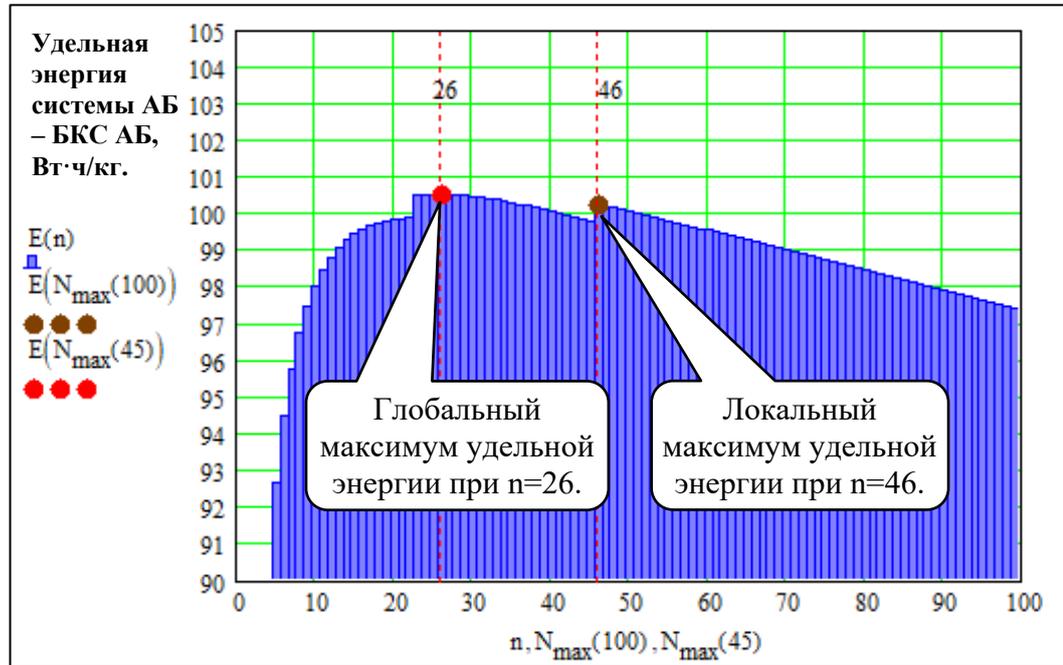


Рисунок 3.7 – График функции (3.40)

График функции (3.38) аналогичен графику функции (3.40), но представляет собой поверхность значений удельной энергии системы АБ – БКС АБ в зависимости от ёмкости АБ и от количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов. При этом для того чтобы при изменении количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов её энергоёмкость оставалась постоянной, в качестве ёмкости в формулу (3.38) необходимо подставить выражение $\frac{C}{n}$, где C – ёмкость, А*ч; n – количество последовательно соединенных аккумуляторов. График функции (3.38) с учетом указанной подстановки представлен на рисунке 3.8.

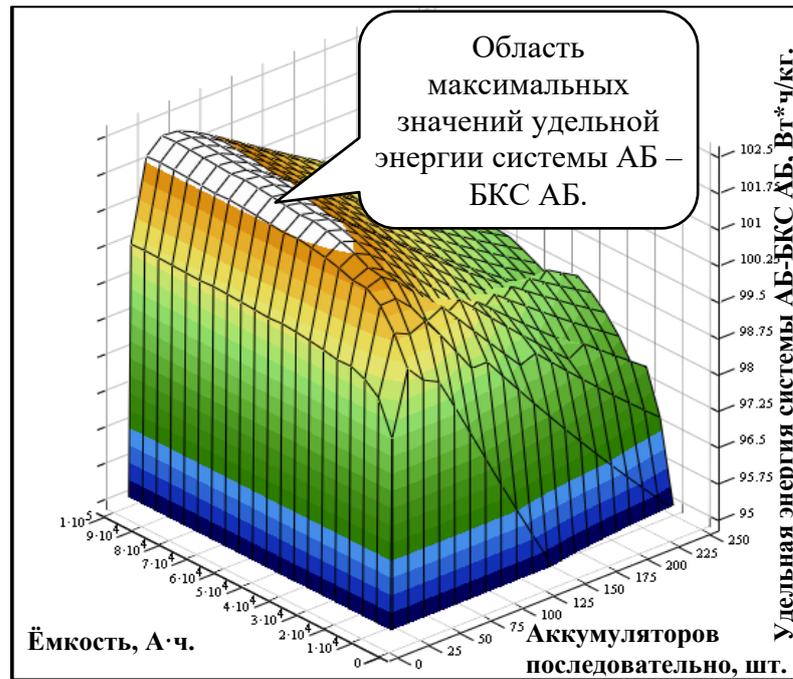


Рисунок 3.8 – График функции (3.37)

На рисунке 3.8 видно, что график функции (3.38) имеет экстремальный характер, т.е. существуют такие сочетания емкости и количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, для которых удельная энергоемкость системы АБ – БКС АБ является наибольшей.

График функции, которая находит значения количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, для которого удельная энергия системы АБ-БКС АБ максимальна, представлен на рисунке 3.9.

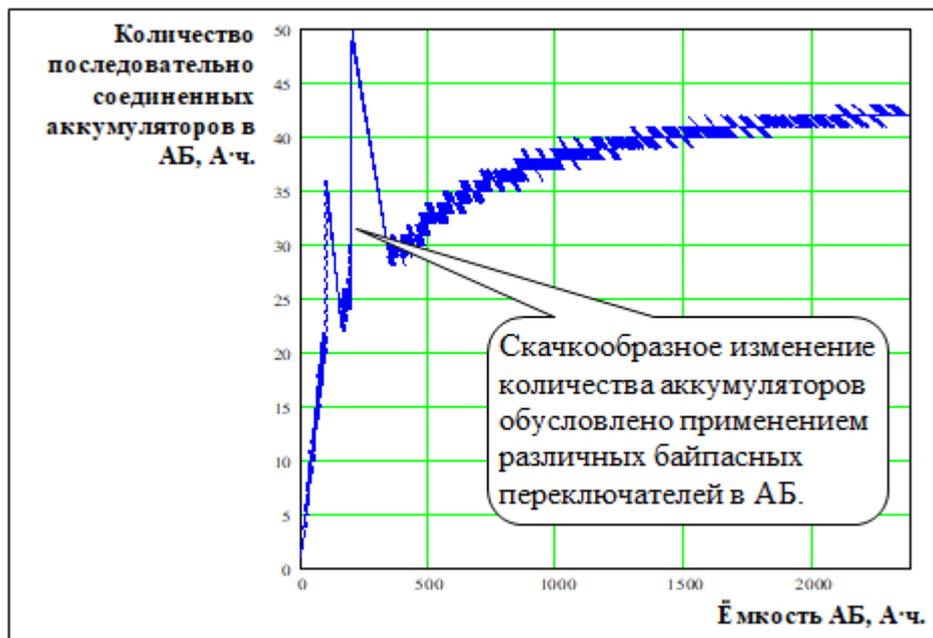


Рисунок 3.9 – График количества последовательно соединенных аккумуляторов при максимальной удельной энергии системы АБ – БКС АБ

На графике (рисунок 3.9) видно, что оптимальное количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ возрастает с ростом ёмкости АБ.

Следует отметить: приведенные зависимости значений максимальной удельной энергии системы АБ – БКС АБ, количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ в зависимости от её ёмкости являются ориентировочными. Это связано с тем, что на оптимальное решение также оказывают влияния параметры ПКЗ АБ и ЭПА. Кроме того, в приведенных выше формулах принято допущение о том, что в процессе разряда АБ ни ток разряда, ни напряжение АБ не изменяются, в то время как при реальном функционировании СЭП ток и напряжение АБ изменяются в процессе разряда АБ.

Тем не менее приведенные выше соотношения и зависимости возможно использовать для того, чтобы сформировать рабочие гипотезы относительно ожидаемого количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, которое соответствует оптимальному значению энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА. Так, для мощности нагрузки КА от 6 до 20 кВт можно ожидать, что значение оптимального количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ будет лежать в диапазоне от 10 до 60 шт.

Перейдем далее к исследованию оптимизации энергомассовых характеристик СЭП в целом для геостационарного космического аппарата.

3.4 Методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП в целом.

Основным критерием, которому должна удовлетворять СЭП любого, в том числе и геостационарного, КА, является выполнение условий неотрицательного энергетического баланса КА во всех режимах его функционирования.

Для выполнения этого критерия необходимо при заданной циклограмме нагрузки КА подобрать требуемые параметры СЭП:

- энергоёмкость комплекта аккумуляторных батарей;
- мощность солнечной батареи;
- диапазоны входных и выходных напряжений и токов, а также мощности силовых преобразователей ЭПА;
- рассчитать и учесть в энергетическом балансе КА потери в бортовой кабельной сети, а также в элементах СЭП.

Поскольку условия неотрицательного энергетического баланса КА должны выполняться во всех режимах его функционирования в течение САС, для того чтобы не проводить расчет для каждого момента времени в течение САС, необходимо определить ограниченное количество расчётных случаев. Выполнение условий неотрицательного энергетического баланса КА для этих расчётных случаев должно гарантировать выполнение условий неотрицательного энергетического баланса КА в течение всего САС.

В качестве расчётных случаев для расчета энергетического баланса геостационарного КА необходимо использовать следующие условия функционирования КА.

1. Конец САС, момент осеннего равноденствия.
2. Конец САС, момент летнего солнцестояния.
3. Начало САС, момент осеннего равноденствия.

В таблице 3.10 представлены характерные особенности приведенных условий, а также характеристики СЭП, которые могут быть определены при расчете энергетического баланса КА в данных условиях.

Таблица 3.10 – Расчетные случаи для расчета энергетического баланса КА

Расчетный случай	Особенности условий функционирования КА	Определяемые характеристики СЭП
Конец осеннее равноденствие САС,	<ul style="list-style-type: none"> – Максимальная длительность теневого участка Земли (ТУЗ) – Сочетание максимальной длительности ТУЗ и минимальной освещенности при максимальной длительности ТУЗ – Максимальные требования по энергопотреблению КА с учетом возможного перехода в режим автономной солнечной ориентации 	<ul style="list-style-type: none"> – Энергоемкость и масса комплекта АБ – Минимальное напряжение и требуемая в конце САС мощность БС – Параметры межблочного силового электрического интерфейса СЭП (максимальные и минимальные значения токов и напряжений БС, АБ и ЭПА на срезе интерфейса с БС и АБ) – Масса БС – Масса БКС БС и БКС АБ – Масса ПКЗ АБ – Значения потерь электрической энергии в элементах СЭП
Конец летнее солнцестояние САС,	<ul style="list-style-type: none"> – Минимальная освещенность БС на витке без ТУЗ 	<ul style="list-style-type: none"> – Требуемая в конце САС мощность БС (подтверждение)
Начало осеннее равноденствие САС,	<ul style="list-style-type: none"> – Сочетание максимальной длительности ТУЗ и минимальной освещенности при максимальной длительности ТУЗ в начале САС 	<ul style="list-style-type: none"> – Максимальное напряжение холостого хода БС

Для проведения расчета энергетического баланса КА в рассмотренных расчетных случаях необходимо сформировать циклограмму нагрузки, т.е. для каждого расчетного случая должны быть определены характерные значения мощности нагрузки, которые действуют на некотором характерном интервале времени. В качестве интервала времени, на котором рассчитывается энергетический баланс геостационарного КА, используется интервал времени длительностью один виток, т.е. 24 часа. Качественно циклограммы нагрузки для

геостационарного КА, которые должны быть использованы для расчета энергетического баланса, могут быть представлены, как показано на рис. 3.10.

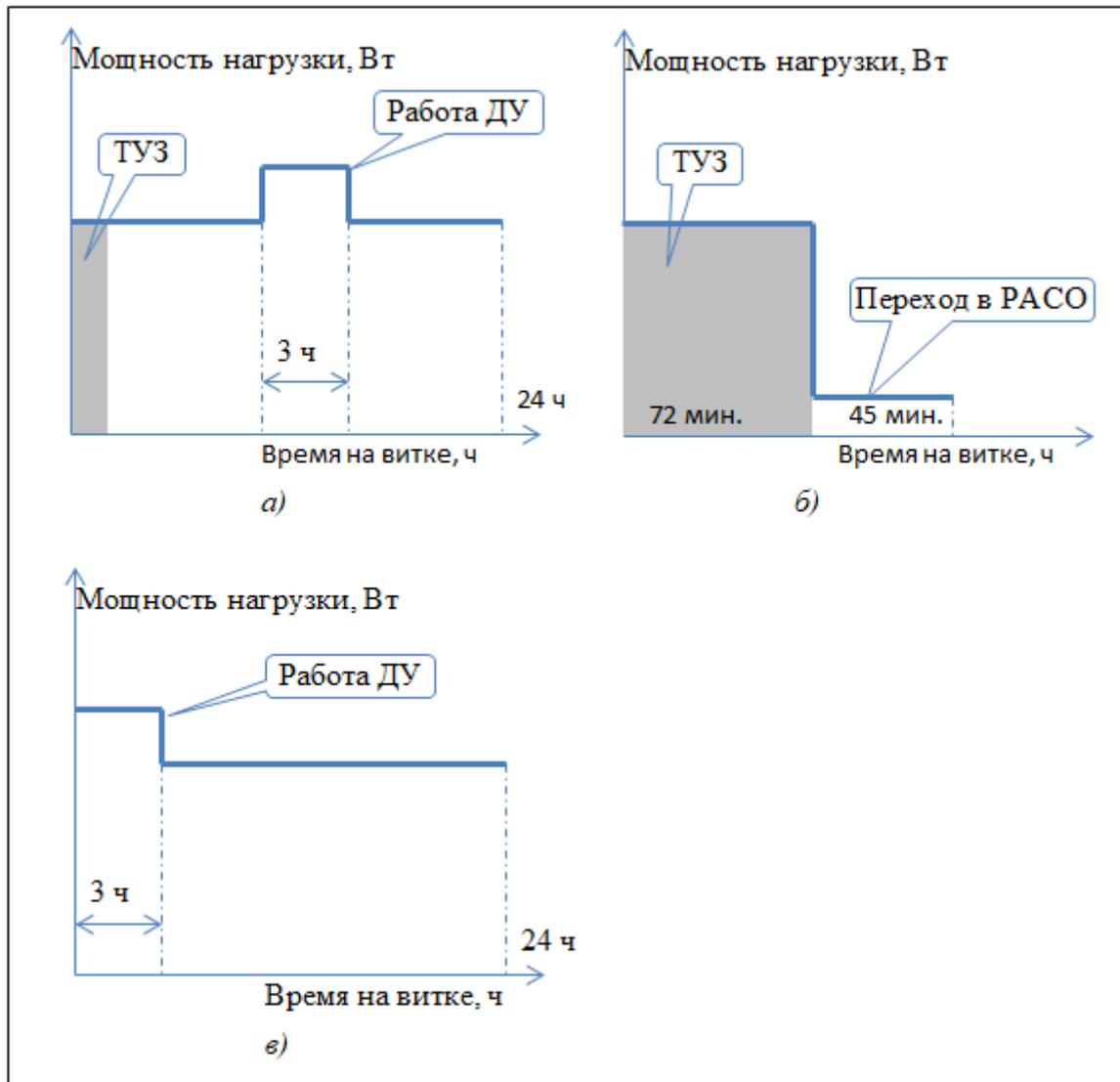


Рисунок 3.10 – Общий вид циклограмм нагрузки геостационарного КА:
 а) – прохождение ТУЗ максимальной длительности в штатном режиме с последующим проведением коррекции удержания орбиты КА; б) – прохождение ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в РАСО; в) – проведение коррекции удержания орбитальной позиции КА

Выполнение условий неотрицательного энергетического баланса КА может осуществляться при различных характеристиках оборудования СЭП, а именно: при различном количестве последовательно соединенных ФП в БС, различном количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ.

Значения количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ определяют параметры силового электрического интерфейса между БС и ЭПА, а также между АБ и ЭПА. Эти параметры, а следовательно, и

количество последовательно соединенных ФП и аккумуляторов, в свою очередь ограничены допустимыми значениями напряжений входных каскадов регуляторов ЭПА: СН и РУ. Так, применяемые в настоящее время в составе регуляторов ЭПА СЭП КА силовые транзисторы имеют максимально допустимое напряжение сток-исток не более 250 В. При этом для выполнения требований по обеспечению функционирования транзисторов в составе ЭПА в течение длительного САС (15 лет) требуется обеспечить не превышение максимального напряжения на этих элементах с учетом понижающего коэффициента 0,7. Поэтому максимальное значение напряжения на входе в СН и РУ, а также на выходе ЗУ ЭПА, не должно превышать 175 В. На практике же это напряжение ограничивается значением 160 В с помощью специального устройства в составе ЭПА – РНБС для интерфейса БС-ЭПА и максимальным значением напряжения заряда АБ путем выбора соответствующего количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ для интерфейса АБ-ЭПА. Поэтому изменение количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ следует осуществлять в диапазоне, который определяется приведенными выше ограничениями.

Для оптимизации энергомассовых характеристик СЭП необходимо для заданной циклограммы нагрузки подобрать такие сочетания количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ из допустимого диапазона этих значений, при которых масса СЭП будет минимальной. При этом для каждого сочетания количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ необходимо выполнение условий неотрицательного энергетического баланса КА.

Расчет энергетического баланса КА осуществляется с использованием имитационной модели СЭП, разработка и функционирование которой рассмотрены в главе 2. Критерии неотрицательного энергетического баланса КА, рассчитываемого с использованием имитационной модели СЭП, приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Критерии неотрицательного энергетического баланса КА

Расчетный случай	Циклограмма нагрузки.	Критерии неотрицательного энергетического баланса.
1. Конец осеннее равноденствие САС,	В соответствии с рис. 3.10, а)	1. Напряжение аккумуляторов в комплекте АБ не менее 2,7 В 2. Завершение заряда комплекта АБ до начала следующего ТУЗ
2. Конец осеннее равноденствие САС,	В соответствии с рис. 3.10, б)	1. Напряжение аккумуляторов в комплекте АБ не менее 2,7 В

Одновременно с выполнением критериев в соответствии с таблицей 3.11 должны быть определены условия применения в составе ЭПА РНБС, а также подтверждена достаточность площади БС и минимального значения напряжения БС в точке максимальной мощности для функционирования КА в период летнего солнцестояния. Данные условия приведены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Условия применения РНБС и достаточности площади БС

Расчетный случай	Циклограмма нагрузки	Критерии и условия
1. Начало осеннее равноденствие САС,	В соответствии с рис. 3.10, а)	1. Если напряжение холостого хода БС превышает 160 В, в составе ЭПА применяется РНБС 2. Если напряжение холостого хода БС не превышает 160 В, в составе ЭПА не применяется РНБС
2. Конец летнее солнцестояние САС,	В соответствии с рис. 3.10, в)	1. Завершение заряда комплекта АБ до начала проведения следующего режима коррекции удержания орбитальной позиции КА 2. Минимальное рабочее напряжение БС на входе в ЭПА не ниже, чем минимальное рабочее напряжение БС на входе в ЭПА в конце САС при осеннем равноденствии (режим 1 по таблице 3.11)

В качестве диапазонов изменения количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ используются следующие значения:

- минимальное количество последовательно соединенных ФП в БС – 30 шт.;

- минимальное количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ – 10 шт.;
- диапазон изменения количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ – 50 шт.

Минимальные значения диапазонов изменения количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ выбраны исходя из:

- физического правдоподобия параметров проектируемых СЭП;
- ограничений и условий, приведенных выше;
- гипотезы о том, что оптимальные значения находятся в пределах выбранного диапазона.

Алгоритмы оптимизации энергомассовых характеристик СЭП рассмотрены в параграфе 3.5.

3.5 Алгоритм оптимизации энергомассовых характеристик СЭП

Как показано в параграфе 3.4, для оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА требуется осуществить перебор значений количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ из заданного диапазона при соблюдении условий неотрицательного энергетического баланса КА. В свою очередь, соблюдение условий неотрицательного энергетического баланса КА требует подбора значений ёмкости комплекта АБ и количества параллельно соединенных ФП в БС при заданном количестве последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ. Таким образом, для решения задачи оптимизации энергомассовых характеристик СЭП требуется варьировать четырьмя параметрами, минимизируя массу системы как функцию этих четырех параметров с учетом имеющихся условий и ограничений.

Данная задача может быть решена с использованием алгоритмов многомерной оптимизации (метод Нелдера – Мида, генетические алгоритмы и т.п.). Однако в этом случае необходимо сформировать достаточно сложную целевую функцию, которая должна учитывать все расчетные случаи и ограничения параметров. При этом в ходе расчета необходимо будет вычислить значительное количество расчетных случаев, при которых условия неотрицательного энергетического баланса не выполняются, поскольку при заданном количестве последовательно соединенных ФП и аккумуляторов, количество параллельно соединенных ФП и емкость комплекта АБ требуется варьировать в достаточно широких пределах. Кроме того, функция массы СЭП в зависимости от её параметров будет иметь локальные минимумы, которые обусловлены дискретным характером изменения массы некоторых составных частей системы за счет изменения количества модулей оборудования. Поэтому решение задачи оптимизации энергомассовых характеристик СЭП с использованием алгоритмов многомерной оптимизации создает риск получения недостоверного результата.

Вместе с тем существует ряд особенностей, которые позволяют сформировать алгоритм оптимизации энергомассовых характеристик СЭП,

который лишен недостатков, указанных выше. Эти особенности заключаются в следующем.

- Три из четырех независимых параметров (количество последовательно и параллельно соединенных ФП и количество последовательно соединенных аккумуляторов) изменяются дискретно в заданном диапазоне значений, и лишь ёмкость комплекта АБ изменяется непрерывно. Т.е. применение численных методов поиска решения требуется лишь для ёмкости комплекта АБ, а остальные параметры могут быть найдены простым перебором в заданном диапазоне допустимых значений.
- Значение ёмкости аккумулятора (или пакета аккумуляторов) для заданного количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ определяется в единственном расчетном случае, которым является прохождение ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в РАСО (рис. 3.10, б)) в условиях осеннего равноденствия в конце САС. Для всех остальных режимов функционирования КА требуемая ёмкость и, соответственно, энергоёмкость АБ будут меньше. В том числе, при расчетах энергетического баланса по рис. 3.10, а) время между окончанием ТУЗ и началом работы двигательной установки КА в режиме коррекции обычно выбирают так, чтобы требуемая за виток энергоёмкость АБ не превышала худший расчетный случай по рис. 3.10 б). Обычно длительность этого интервала времени составляет от трех до пяти часов и выбирается исходя из условия неперевышения максимально допустимой глубины разряда АБ.
- Условие применения в составе ЭПА ЭРМ БС обеспечивает достаточность мощности и площади БС, определенной по режиму 3.10, а) в условиях осеннего равноденствия в конце САС, для режима 3.10, в) в условиях летнего солнцестояния в конце САС. Это означает, что для определения параметров БС (мощность и площадь) достаточно провести расчеты энергетического баланса для режима 3.10, а) в условиях осеннего равноденствия в конце САС.

Данные особенности позволяют сформировать следующий порядок расчета параметров СЭП геостационарного КА и поиска максимума энергомассовых характеристик СЭП в заданном диапазоне изменения её параметров.

1. Определение требуемой ёмкости комплекта АБ для заданного из области допустимых значений количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов (пакетов аккумуляторов) с использованием численных методов оптимизации. Расчеты осуществляются для случая прохождения ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в РАСО (рис. 3.10, б) в условиях осеннего равноденствия в конце САС. Диапазон изменения количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов – от 10 до 59 шт.
2. Формирование диапазона количества последовательно соединенных ФП в БС из области допустимых значений, обусловленной имеющимися ограничениями в части максимального напряжения БС. Диапазон изменения количества последовательно соединенных ФП в БС – от 30 до 79 шт.
3. Поиск минимального количества параллельно соединенных ФП в БС, обеспечивающих выполнение условий неотрицательного энергетического баланса для расчетного случая в соответствии с рис. 3.10, а) (виток с прохождением ТУЗ максимальной длительности) в условиях осеннего равноденствия в конце САС.
4. Формирование матрицы значений количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ, каждому сочетанию значений которых соответствует значение массы СЭП.

Таким образом,

- каждому значению последовательно соединенных аккумуляторов в АБ ставится в соответствие минимально необходимое значение ёмкости комплекта АБ;
- каждому значению количества последовательно соединенных ФП в БС ставится в соответствие минимально необходимое количество параллельно соединенных ФП в БС;

- каждому сочетанию количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ ставится в соответствие значение массы СЭП заданной выходной мощности.

Процесс расчета ёмкости комплекта АБ для заданного количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ представлен на рисунке 3.11. Расчет осуществляется с использованием симплекс метода, реализованного в инструменте Simulink Design Optimization пакета Simulink MATLAB. Критерием завершения расчета является минимальное значение ёмкости комплекта АБ при условии, что значение напряжения на аккумуляторах не снижается ниже 2,7 В. На рисунке 3.11 видно, что для поиска минимального значения емкости АБ требуется около тридцати итераций.

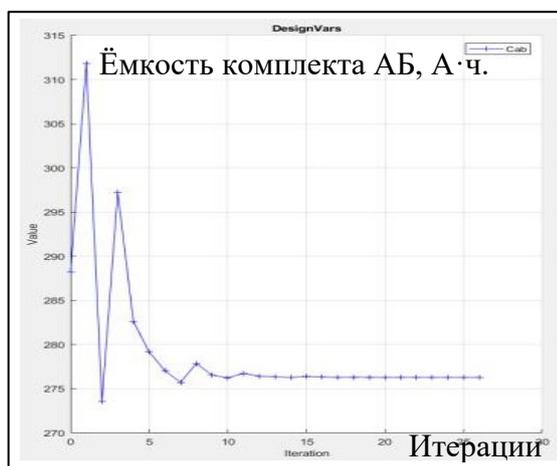


Рисунок 3.11 – Процесс подбора минимальной ёмкости комплекта АБ симплекс – методом

Зависимость минимально необходимой ёмкости комплекта АБ от количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ представлена на рисунке 3.12.

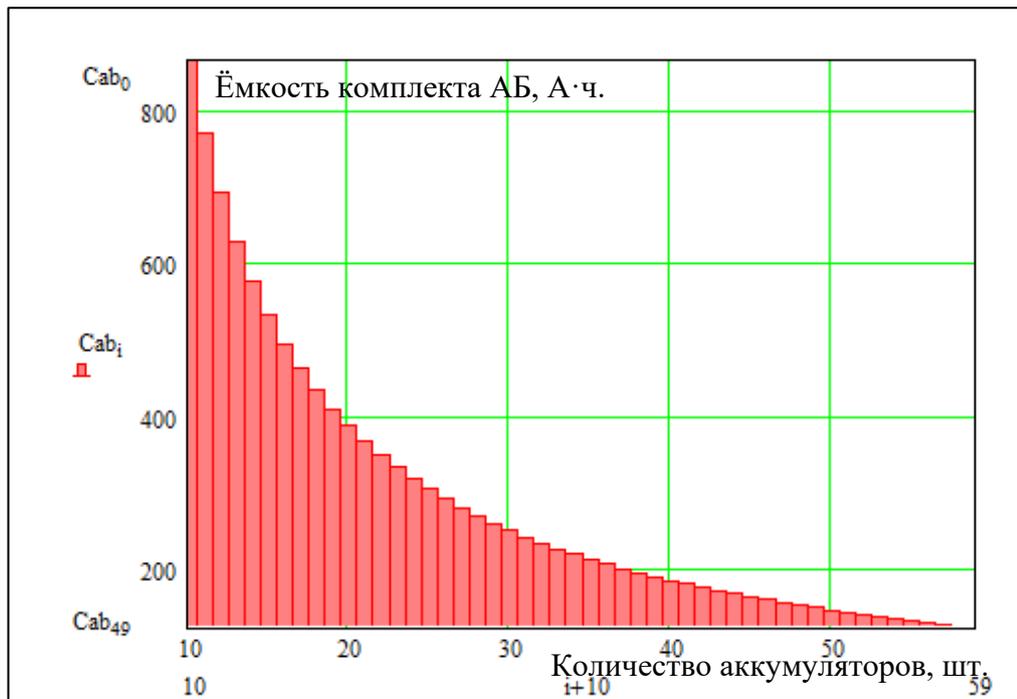


Рисунок 3.12 – Зависимость ёмкости комплекта АБ от количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов

Алгоритм поиска минимально необходимого количества параллельно соединенных ФП при заданном количестве последовательно соединенных ФП представлен на рисунке 3.13.

Результат расчета минимально необходимого количества параллельно соединенных ФП при заданном количестве последовательно соединенных ФП в БС представлен на рисунке 3.14.

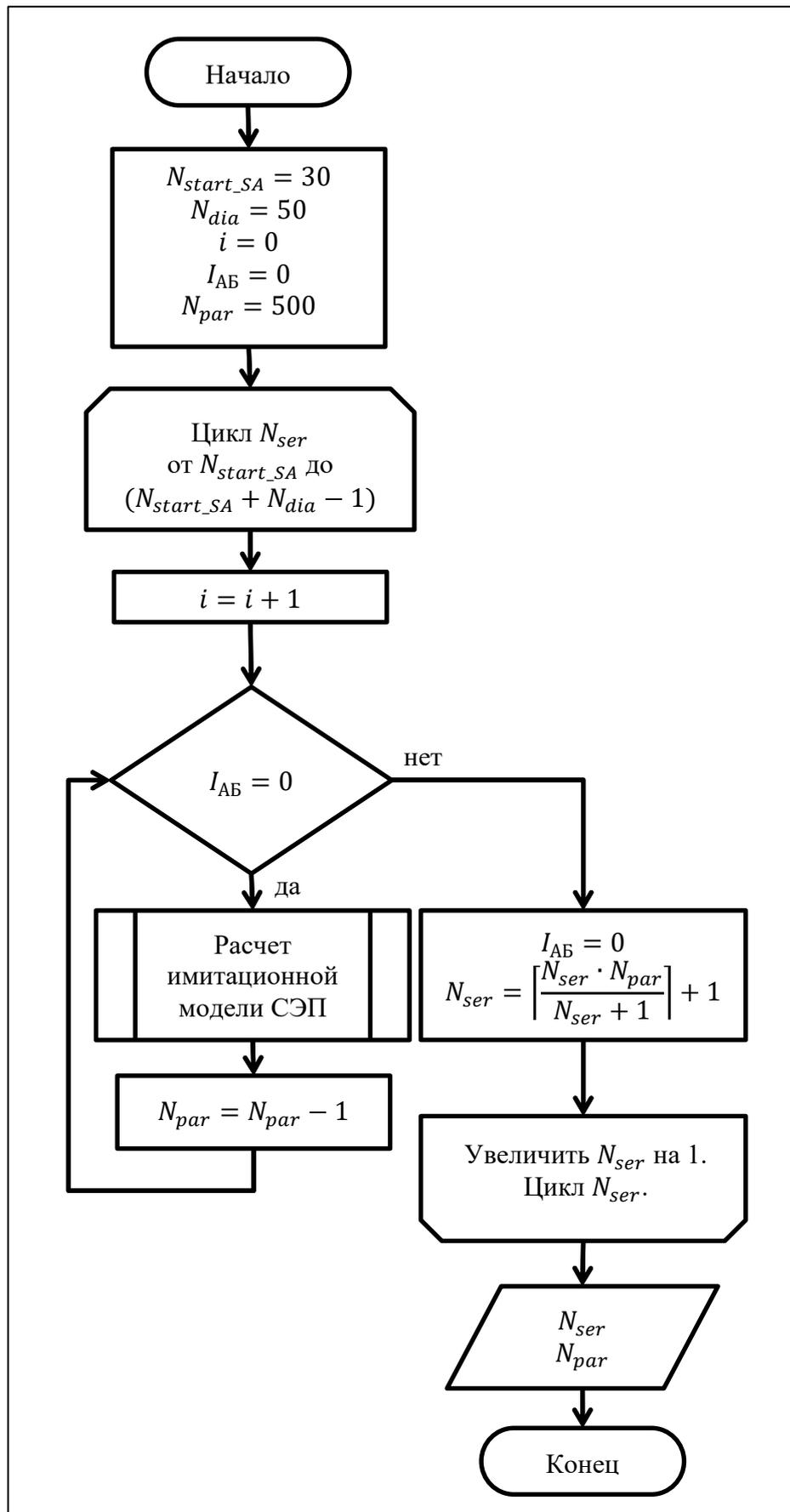


Рисунок 3.13 – Блок-схема алгоритма расчета минимально необходимого количества параллельно соединенных ФП в БС

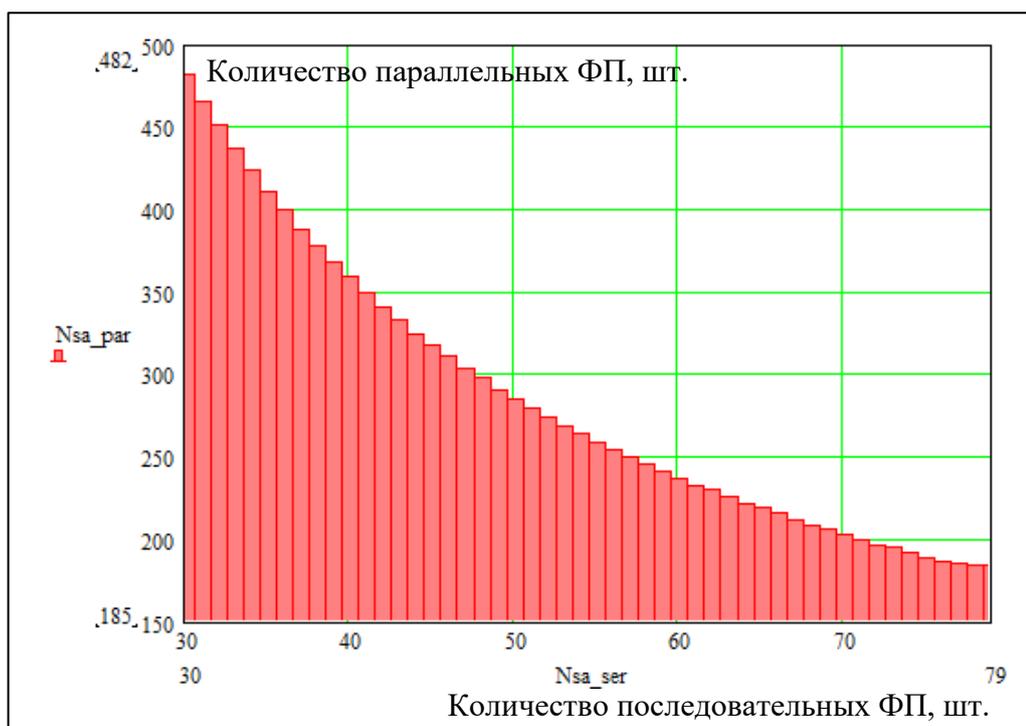


Рисунок 3.14 – Пример зависимости минимально необходимого количества параллельно соединенных ФП от количества последовательно соединенных ФП в БС

Масса СЭП геостационарного КА для выбранной выходной мощности определяется путем расчета имитационной модели СЭП при известных значениях параметров БС и АБ. Масса составных частей СЭП определяется исходя из действующих значений параметров СЭП в заданном расчетном случае.

График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт представлен на рисунке 3.15. Максимальное значение удельной мощности СЭП отмечено на рис. 3.15 точкой. Проведение анализа оптимальных параметров СЭП для выходной мощности 6 кВт по разработанному алгоритму показывает, что удельная выходная мощность СЭП становится максимальной при количестве последовательно соединенных ФП в БС, равном 78 шт., и количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, равном 34 шт. Значение массы СЭП при этих параметрах АБ и БС составляет 181,3 кг и отмечено на рисунке 3.16 точкой.

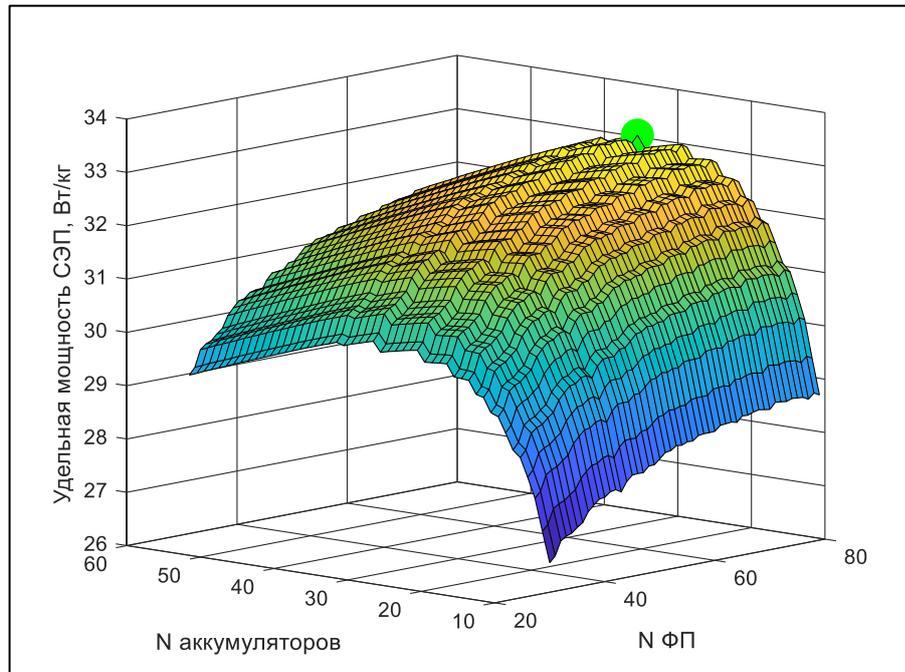


Рисунок 3.15 – График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт

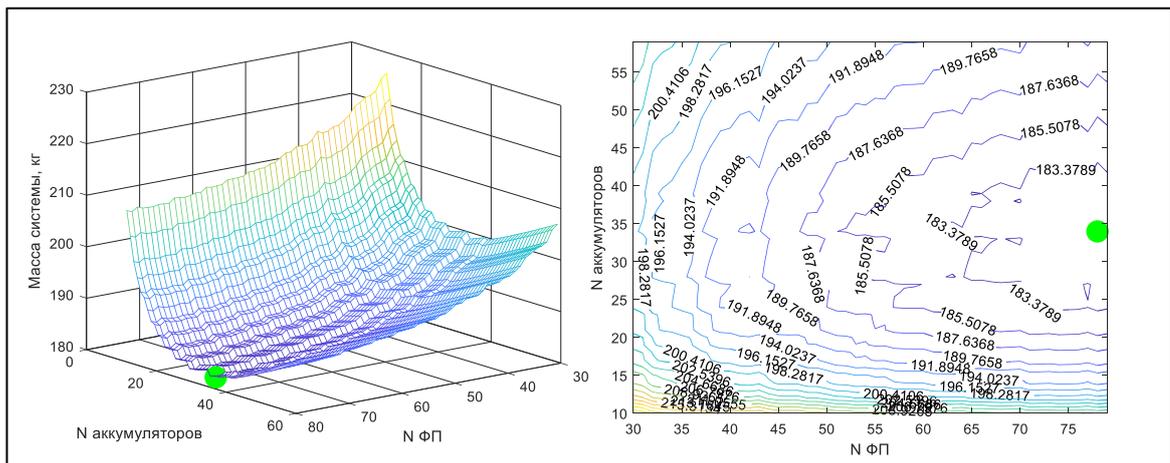


Рисунок 3.16 – Поверхность значений и изолинии массы СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт

Значение максимальной удельной мощности СЭП при оптимальных параметрах БС и АБ составляет 33,1 Вт/кг. Следует отметить, что удельная мощность разработанных в период с 2010 по 2020 гг. СЭП мощностью около 6 кВт составляет около 30 Вт/кг [36], что хорошо совпадает с результатами проведенного анализа.

График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 13 кВт представлен на рисунке 3.17. Положение максимума удельной мощности на рисунке 3.17 показано точкой.

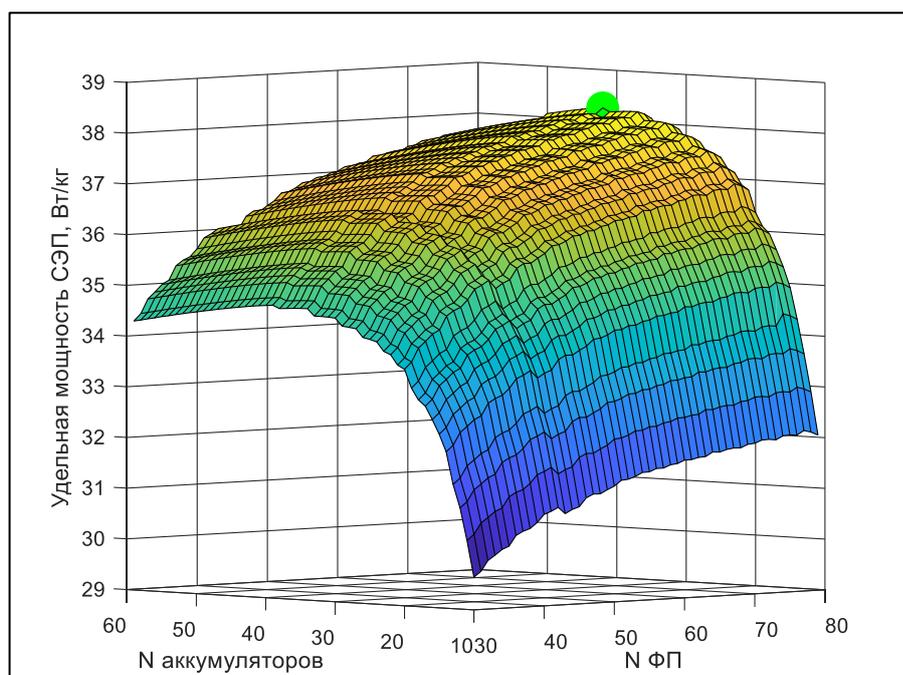


Рисунок 3.17 – График удельной мощности СЭП геостационарного КА

Оптимальные энергомассовые характеристики СЭП геостационарного КА мощностью 13 кВт достигаются при количестве последовательно соединенных ФП в БС, равном 77 шт., и количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, равном 39 шт. Удельная мощность СЭП при оптимальных параметрах составляет 38,3 Вт/кг.

График удельной мощности СЭП для выходной мощности 20 кВт показан на рисунке 3.18. Экстремум отмечен точкой, а значение максимальной удельной мощности СЭП при оптимальных параметрах БС и АБ составляет 40,8 Вт/кг. Максимальная удельная мощность СЭП геостационарного КА выходной мощностью 20 кВт достигается при количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, равном 42 шт., и количестве последовательно соединенных ФП в БС, равном 76 шт.

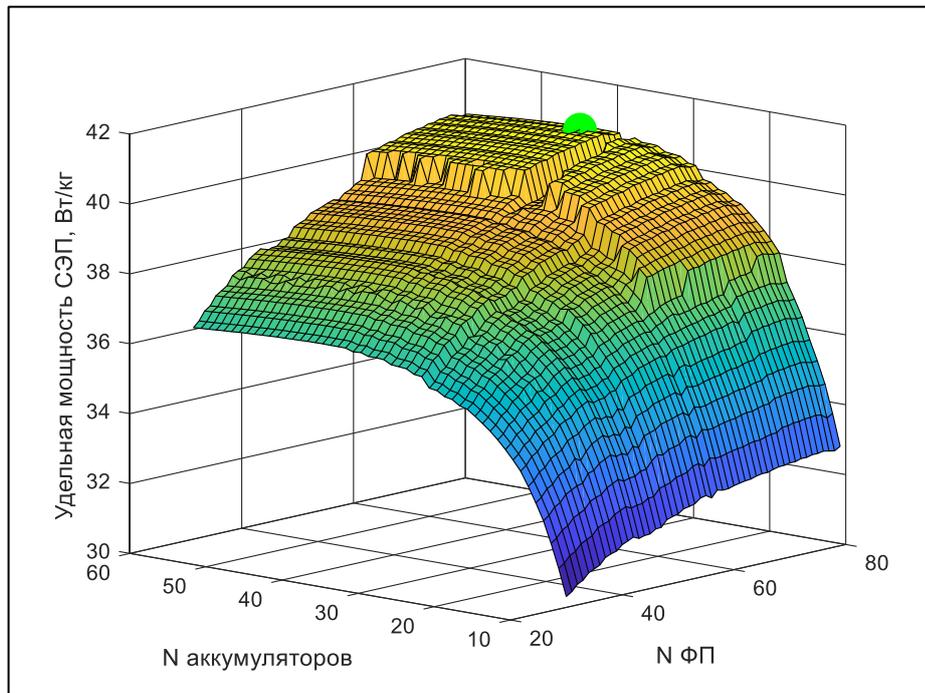


Рисунок 3.18 – График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 20 кВт

Анализ полученных результатов расчета массы СЭП геостационарного КА при изменении количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ показывает следующее.

С ростом количества последовательно соединенных ФП в БС масса СЭП снижается (растет удельная выходная мощность СЭП), образуя локальные минимумы. Наличие локального минимума при значении количества последовательно соединенных ФП в БС, равном 42 шт. обусловлено исключением из состава ЭПА РНБС. Далее наблюдается глобальный минимум в области значений количества последовательно соединенных ФП в БС, равном от 76 до 78 шт.

В допустимом диапазоне изменения количества последовательно соединенных аккумуляторов (пакетов аккумуляторов) в АБ наблюдается глобальный минимум. Наличие глобального минимума объясняется ростом доли массы корпусных деталей АБ, а также ростом массы ПКЗ АБ с ростом количества каналов контроля при увеличении количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ.

Результаты оптимизации энергомассовых характеристик трех вариантов СЭП геостационарного КА мощностью 6, 13 и 20 кВт приведены в таблице 3.13.

Таблица 3.13 – 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 1 367 Вт/м ² и температуре 28 °С, Вт	7 380	15 408	23 400

Повышение удельной мощности СЭП геостационарного КА в результате оптимизации ее энергомассовых характеристик относительно существующих решений в части количества последовательных элементов СБ и АБ составляет 3,4% для СЭП мощностью 6 кВт и 4,9% для СЭП мощностью 13 кВт.

Предварительная оценка итоговых результатов исследований показывает, что оптимизация по предложенной методике [86] энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт позволяет снизить массу СЭП на 3,4%, а для СЭП мощностью 13 кВт – на 4,9% относительно известных решений в части количества последовательно соединенных элементов в СБ и АБ. По экспертной оценке указанное повышение энергомассовых характеристик СЭП для КА тяжелого класса с мощностью полезной нагрузки 13 кВт позволит установить дополнительно как минимум один транспондер полезной нагрузки. Экономический эффект от введения дополнительно одного транспондера полезной нагрузки составляет около 300...450 млн руб. для одного геостационарного КА тяжелого класса.

3.6 Выводы

Из состава СЭП выделены две подсистемы (БС – БКС БС, и АБ – БКС АБ), которые имеют экстремальных характер энергомассовых характеристик в зависимости от параметров элементов, входящих в состав этих подсистем. Показаны области значений параметров СЧ СЭП рассматриваемых подсистем, в которых следует ожидать наличие экстремальных значений энергомассовых характеристик. Обоснованы параметры расчета характеристик БКС БС и БКС АБ.

Сформированные функции расчета массы СЧ СЭП позволяют получить расчетные случаи для определения энергетического баланса геостационарного КА. На основе имитационной модели системы электропитания, разработанной во второй главе диссертации, организуется алгоритм оптимизации энергомассовых характеристик СЭП.

Полученные графические зависимости в виде поверхностей значений массы и удельной мощности СЭП геостационарного КА для нескольких значений выходной мощности СЭП убедительно отражают наличие глобального экстремума. Показано, что энергомассовые характеристики СЭП могут быть оптимизированы в заданном диапазоне изменений параметров составных частей СЭП, а именно: количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ.

Глава 4. Технические средства для проведения экспериментальных исследований и верификация модели СЭП

В предыдущих главах были подробно рассмотрены имитационная модель СЭП геостационарного КА, а также алгоритм оптимизации характеристик СЭП геостационарного КА на ее основе. Адекватность разработанной имитационной модели СЭП подтверждена с использованием экспериментальных данных, полученных при испытаниях реальных образцов составных частей СЭП (БС, АБ и ЭПА).

Объем экспериментальных исследований СЭП КА в значительной степени обусловлен ограничениями, связанными со стоимостью и сроками разработки и изготовления опытных образцов СЧ СЭП и СЭП в целом, а также недоступностью экспериментальных данных летной эксплуатации СЭП требуемой структуры и состава.

Для проверки совместной работы элементов СЭП в процессе наземной экспериментальной отработки применяются электрические имитаторы БС и АБ [76]. Электрические характеристики имитаторов АБ и БС соответствуют электрическим характеристикам реальных объектов лишь в части интерфейсных параметров, т.е. рабочих значений выходных токов и напряжений, а также формы имитируемой ВАХ для имитатора БС. Этого достаточно для осуществления наземной экспериментальной отработки СЭП. Такой подход позволяет использовать имитаторы АБ и БС как универсальные устройства, которые возможно применять для имитации электрических характеристик АБ и БС различной конфигурации в процессе наземной экспериментальной отработки СЭП. Требования воспроизведения с заданной точностью вольт-амперных и зарядно-разрядных характеристик БС и АБ к имитаторам БС и АБ не предъявляются. Поэтому возможность воспроизведения с заданной точностью с помощью имитаторов БС и АБ вольт-амперных и зарядно-разрядных характеристик реальных образцов БС и АБ и, соответственно, применение имитаторов для экспериментальных исследований отсутствует.

Использование данных летной эксплуатации СЭП геостационарных КА для проведения экспериментальных исследований также недоступно в связи с ограничением открытого доступа к этим данным. Кроме того, в настоящее время в составе эксплуатирующихся на орбите геостационарных КА отсутствуют образцы СЭП требуемой структуры и состава.

Таким образом, с учетом перечисленных ограничений экспериментальные исследования осуществляются на отдельных образцах составных частей СЭП рассматриваемой структуры.

4.1 Испытания БС и результаты подтверждения адекватности модели БС экспериментальным данным

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

В состав АКПА БС входят следующие основные блоки:

- блок импульсного осветителя;
- блок измерения параметров;
- комплект кабелей;
- датчик контроля условий измерений;
- персональный компьютер со специализированным программным обеспечением обработки и представления результатов измерений.

Устройство и принцип работы АКПА БС рассмотрены в патенте [78].

Примененная для испытаний опытного образца АКПА БС позволяет осуществлять контроль параметров БС в диапазоне напряжений от 10 до 210 В и токов от 0,4 до 40 А.

Уровень облученности в рабочей зоне испытуемого образца БС составляет (1367 ± 7) Вт/м². Отклонение уровня эквивалентной облученности в рабочей зоне от среднего значения $\pm 3\%$. Площадь рабочей зоны составляет 3,5×2,2 м при расстоянии от образца до осветителя 8 м и 4,0×2,2 м при расстоянии от образца до осветителя 9 м.

Точность регистрации напряжения испытуемой БС в каждой точке диапазонов 60; 90; 120; 150; 180; 210 В в пределах $\pm 0,5\%$ от верхнего значения установленного диапазона. Точность регистрации тока испытуемой БС в каждой точке диапазонов 1,25; 2,5; 5; 10; 20; 40 А, в пределах $\pm 0,5\%$ от верхнего значения установленного диапазона.

Внешний вид основного блока АКПА БС – импульсного осветителя – представлен на рисунке 4.1. В качестве входного воздействия на БС с помощью

АКПА БС подавался импульс излучения, соответствующий условиям АМ0, и в течение двух миллисекунд осуществлялся замер характеристик ВАХ БС в нескольких точках путем изменения сопротивления нагрузки тестируемой БС.



Рисунок 4.1 – Внешний вид импульсного осветителя АКПА БС

Для подтверждения адекватности модели БС использованы данные испытаний одной панели БС геостационарного КА, разработанного АО «ИСС». В панель БС входят 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 БС проводились в рамках этапа приемосдаточных испытаний опытно-конструкторской работы по разработке БС в АО «Сатурн».

Подтверждение адекватности модели БС проводится путем идентификации значений параметров ФП в БС: I_{opt} , I_{sc} , V_{opt} , V_{oc} (см. уравнения (2.5-2.8), представленные в главе 2). Для этого проводится модельный эксперимент, воспроизводящий условия испытаний реальной БС, т.е. осуществляется замер параметров ВАХ БС в условиях АМ0 в тех же точках, что и при испытаниях реальной БС. Далее, параметры ФП в модели БС изменяются таким образом, чтобы ошибка между данными эксперимента и данными, получаемыми по

модели, была минимальной. Подбор значений параметров ФП в модели БС осуществляется одним из методов многомерной оптимизации (например, симплекс – методом) с использованием пакета Simulink MATLAB.

Для подтверждения адекватности модели БС требуется, чтобы идентифицированные значения параметров ФП БС (I_{opt} , I_{sc} , V_{opt} , V_{oc}) совпадали со значениями, которые указаны в спецификации применяемых ФП с точностью не хуже $\pm 5\%$.

Сравнение результатов испытаний БС с данными, которые получены с помощью имитационной модели БС, приведены на рисунке 4.2.

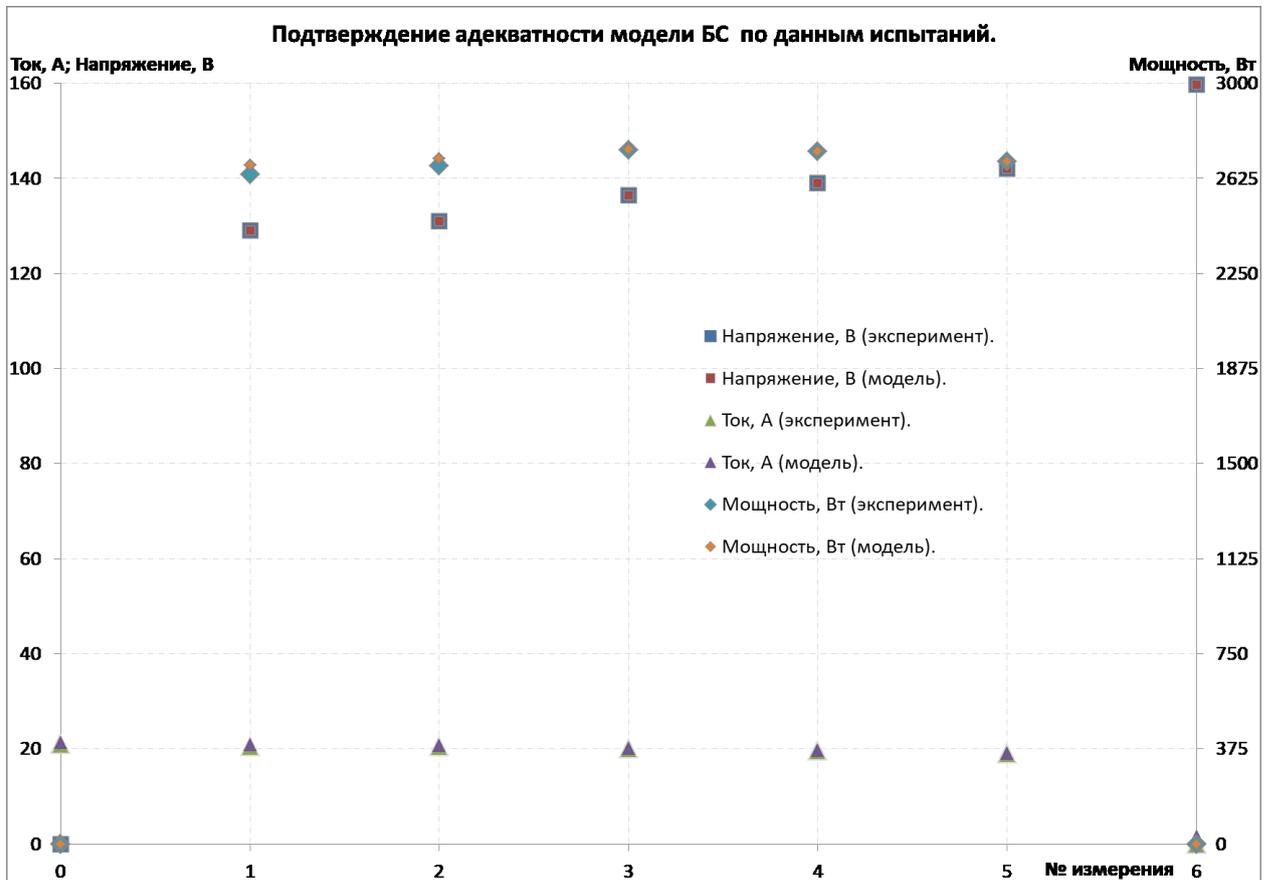


Рисунок 4.2 – Подтверждение адекватности модели БС

Отклонение 3 сигма ошибки нормального распределения случайной величины между экспериментальными данными и данными, полученными по модели, составило не более 2,17 % для значения тока при известном значении напряжения и не более 1,74 % для мощности. Идентифицированные параметры ФП представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Идентифицированные параметры ФП БС

Параметр	Значение	Обозначение
Ток короткого замыкания ФП, А	0,5179	I_{sc0}
Ток ФП в точке максимальной мощности, А	0,4899	I_{opt0}
Напряжение ФП в точке максимальной мощности, В	2,4046	V_{opt0}
Напряжение холостого хода ФП, В	2,6615	V_{oc0}

Указанные в таблице 4.1 данные хорошо совпадают с данными, приводимыми производителем ФП (TJ Solar Cell 3G30C AZUR SPACE, Германия). Данные по начальным характеристикам ФП приведены на рисунке 4.3 [79].

Electrical Data					
		BOL	2,5E14	5E14	1E15
Average Open Circuit V_{oc}	[mV]	2700	2616	2564	2522
Average Short Circuit I_{sc}	[mA]	520.2	518.5	514.0	501.9
Voltage at max. Power V_{mp}	[mV]	2411	2345	2290	2246
Current at max. Power I_{mp}	[mA]	504.4	503.2	500.6	486.6
Average Efficiency η_{bare} (1367 W/m ²)	[%]	29.5	28.6	27.8	26.5
Average Efficiency η_{bare} (1353 W/m ²)	[%]	29.8	28.9	28.1	26.8
Standard: CASOLBA 2005 (05-20MV1, etc); Spectrum: AMO WRC = 1367 W/m ² ; T = 28 °C					
@fluence 1MeV [e/cm ²]					

Рисунок 4.3 – Данные спецификации на ФП производства Azur Space

Ошибка определения значений параметров ФП между модельными данными и данными производителя приведена в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – 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

Указанные выше результаты подтверждают адекватность модели БС с требуемой точностью как для электрических, так и для тепловых характеристик. Дополнительно на рисунке 4.4 приведен график изменения температуры БС при прохождении геостационарного КА теневого участка Земли в сравнении с данными, полученными по модели. Источником экспериментальных данных

является секция БС геостационарного КА, состоящая из восьми элементарных генераторов, соединенных параллельно. Каждый элементарный генератор данной секции БС содержит 59 последовательно соединенных ФП.

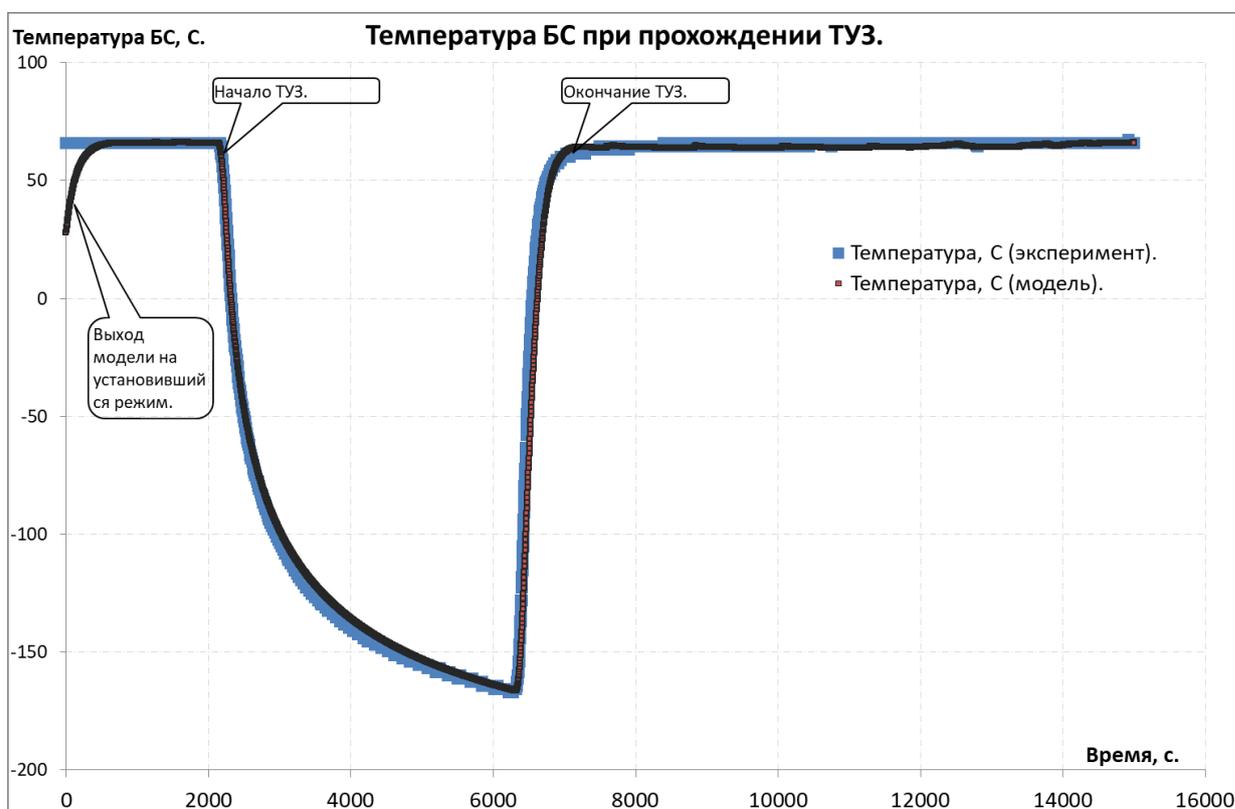


Рисунок 4.4 – Изменение температуры БС при прохождении ТУЗ на ГСО

Отклонение 3 сигма ошибки нормального распределения случайной величины между экспериментальными данными и данными, полученными по модели, составило не более $2,03^{\circ}\text{C}$ для освещенного участка орбиты (0,87 % от диапазона изменения).

Таким образом, в результате экспериментальных исследований подтверждена адекватность разработанной имитационной модели БС. Разработанная имитационная модель БС воспроизводит ВАХ БС с требуемой для практических инженерных расчетов точностью, при этом в имитационной модели БС учитывается взаимовлияние электрических и тепловых режимов работы БС.

4.2 Испытания ЛИАБ и результаты подтверждения адекватности модели АБ экспериментальным данным

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) [80]. 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.

ЗРПАК обеспечивает заряд и разряд литий-ионных аккумуляторных батарей током до 150 А (при параллельном объединении трех стоек ЗРК). Допустимое напряжение литий-ионной АБ при ее тестировании с помощью ЗРПАК составляет до 120 В. Внешний вид основного силового элемента ЗРПАК – стойки ЗРК представлен на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Внешний вид ЗРК из состава ЗРПАК

Экспериментальные исследования разработанной имитационной модели АБ проводились с использованием результатов испытаний образца 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.

Результатами испытаний указанных образцов штатных литий-ионных АБ являются их разрядные характеристики, т.е. значения напряжения и тока АБ в процессе заряда и разряда.

Подтверждение адекватности имитационной модели литий-ионной АБ осуществлялось путем идентификации параметров имитационной модели АБ в конфигурации 2×22ЛИ85.

Характеристики аккумулятора ЛИГП-85, а также ЛИАБ 2×22ЛИ85, которые возможно использовать в составе модели, приведены в таблице 4.3 [73, 74].

Таблица 4.3 – Характеристики ЛИГП-85 и ЛИАБ 2×22ЛИ85

Параметр	Значение	Обозначение
Полная ёмкость ЛИА, А·ч	103	Cab
Количество последовательно соединенных пакетов аккумуляторов, шт.	22	Nakk_ps
Количество параллельно соединенных аккумуляторов в пакете, шт.	2	Nakk_pr
Максимальное напряжение разомкнутой цепи полностью заряженного ЛИА, В	4,15	Vakk_max

Идентифицируемые параметры имитационной модели литий-ионной АБ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Идентифицируемые параметры модели ЛИАБ

Параметр	Обозначение
Внутренне сопротивление ЛИА, Ом	$R_{акк}$
Напряжение разомкнутой цепи полностью заряженного ЛИА, В	E_0
Константа поляризации, $A \cdot ч^{-1}$	K
Эмпирические коэффициенты модели	$K1, A, A1, B, B1$

Идентификация параметров модели ЛИАБ осуществляется в два этапа. На первом этапе по экспериментальным данным определяются значения напряжения разомкнутой цепи полностью заряженного ЛИА и внутреннего сопротивления ЛИАБ, а также идентифицируются параметры модели K , A и B по экспериментальным данным разрядной характеристики ЛИАБ. Далее осуществляется идентификация параметров $K1, A1, B1$.

Идентификацию параметров модели ЛИАБ удобно проводить одним из методов многомерной оптимизации, например с помощью метода Нелдера – Мида [81]. Значения параметров модели ЛИАБ, идентифицированные на первом этапе приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты идентификации параметров модели ЛИАБ

Параметр	Значение	Обозначение
Максимальное напряжение разомкнутой цепи полностью заряженного ЛИА, В	4,14	$V_{акк_max}$
Внутреннее сопротивление ЛИАБ, Ом	$28,11 \cdot 10^{-3}$	R
Внутренне сопротивление ЛИА, Ом	$0,9438 \cdot 10^{-3}$	$R_{акк}$
Константа поляризации, $A \cdot ч^{-1}$	$2,147 \cdot 10^{-3}$	K
Эмпирические коэффициенты модели	9,066	A
	0,023	B

График изменения напряжения разрядной характеристики ЛИАБ 2×22ЛИИ85, полученной по экспериментальным данным, и график напряжения имитационной модели ЛИАБ приведены на рисунке 4.6.

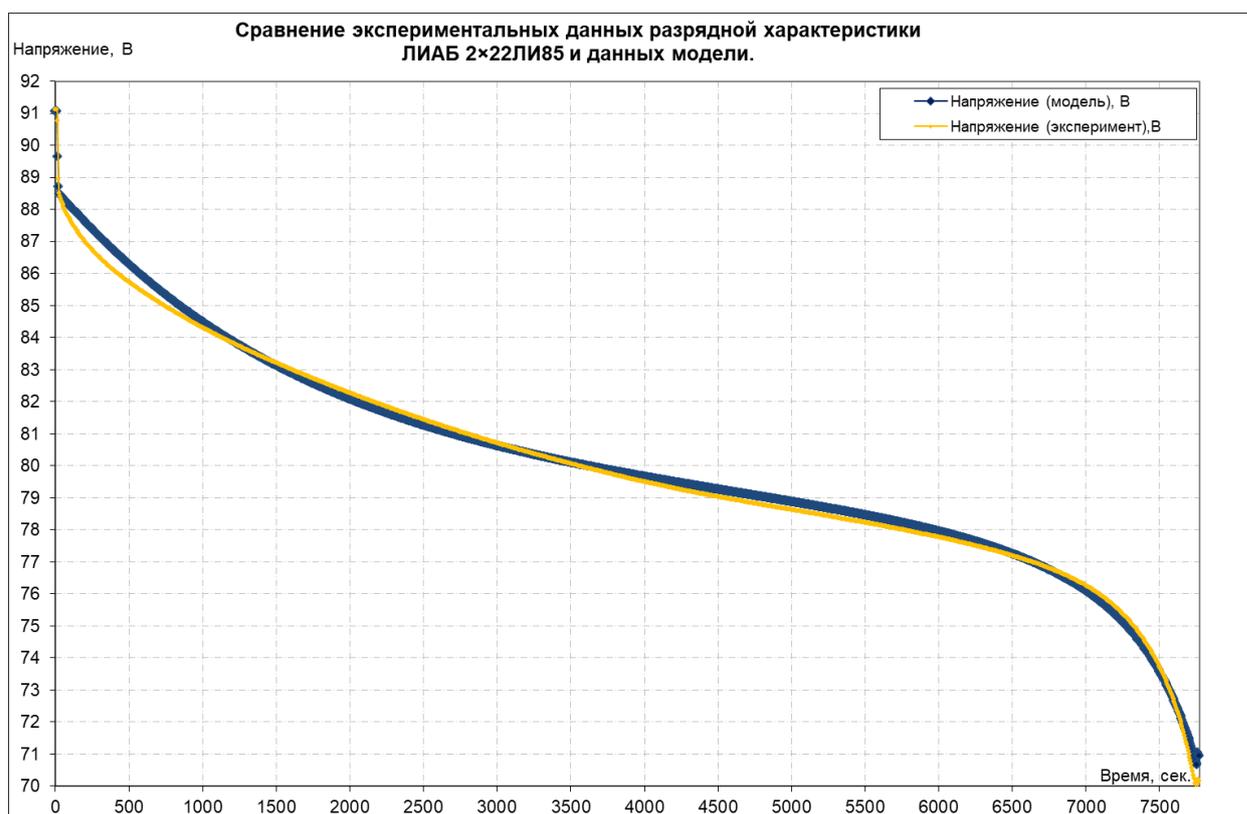


Рисунок 4.6 – Разрядная характеристика ЛИАБ 2×22ЛИ85 и модели

Отклонение 3 сигма нормального распределения случайной величины, вычисленное по измеренным и модельным значениям напряжения разрядной характеристики ЛИАБ, составляет 0,7 В (0,98 %).

Численные значения параметров $K1$, $A1$, $B1$, полученные в результате выполнения второго этапа идентификации параметров, приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – результаты идентификации параметров модели ЛИАБ

Параметр	Значение	Обозначение
Эмпирические коэффициенты модели	0.337	$K1$
	0.989	$A1$
	0.504	$B1$

График изменения напряжения ЛИАБ на разряде и при последующем заряде в сравнении со значениями напряжения ЛИАБ, полученными по модели, приведен на рисунке 4.7.

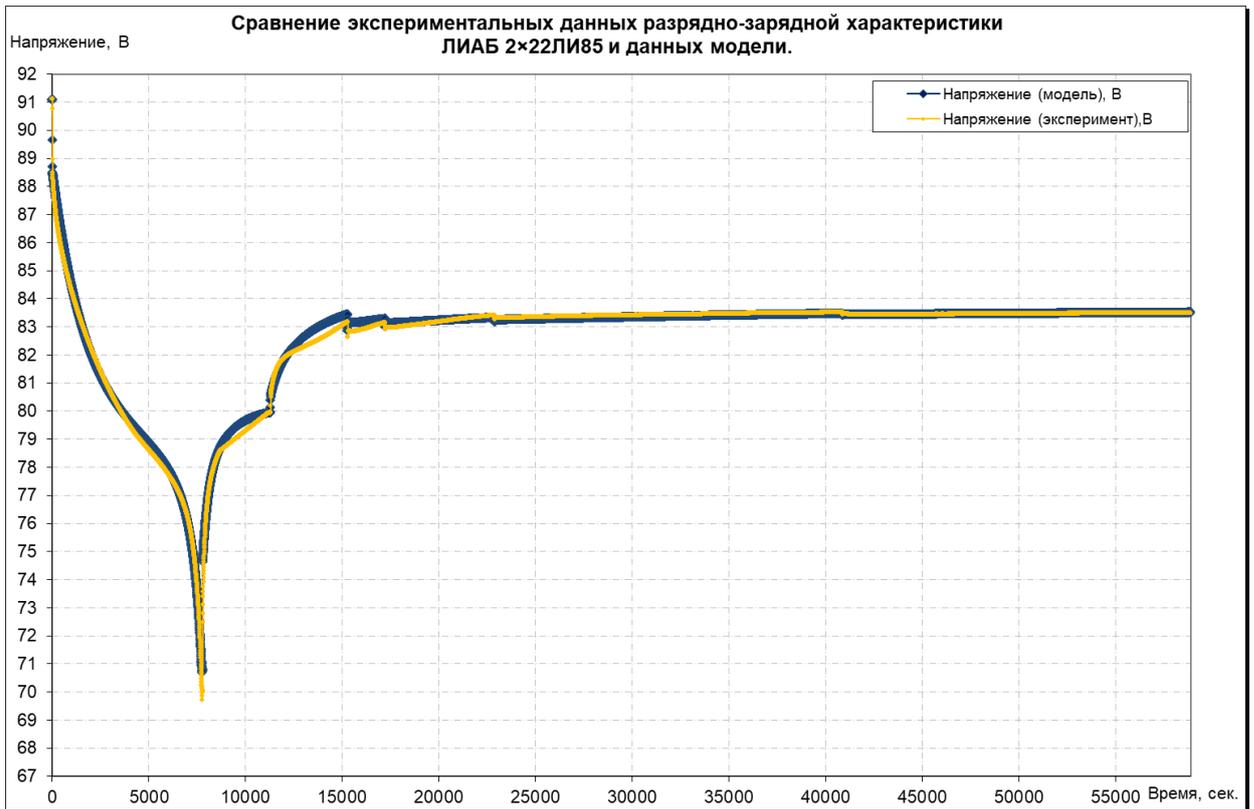


Рисунок 4.7 – Сравнение экспериментальных данных разрядно-зарядной характеристики ЛИАБ 2×22ЛИ85 и данных модели

Отклонение 3 сигма нормального распределения случайной величины, вычисленное по измеренным и модельным значениям напряжения разрядной характеристики ЛИАБ составляет, 0.43 В (0.61 %).

Далее, для подтверждения адекватности имитационной модели ЛИАБ при произвольном значении емкости аккумулятора и количества аккумуляторов в последовательной цепи АБ, ранее идентифицированные параметры модели применены к модели ЛИАБ в конфигурации 23ЛИ65.

На рисунке 4.8 представлен результат применения идентифицированных ранее параметров модели к ЛИАБ в конфигурации 23ЛИ65. В имитационной модели ЛИАБ изменено только количество последовательно соединенных аккумуляторов и их ёмкость.

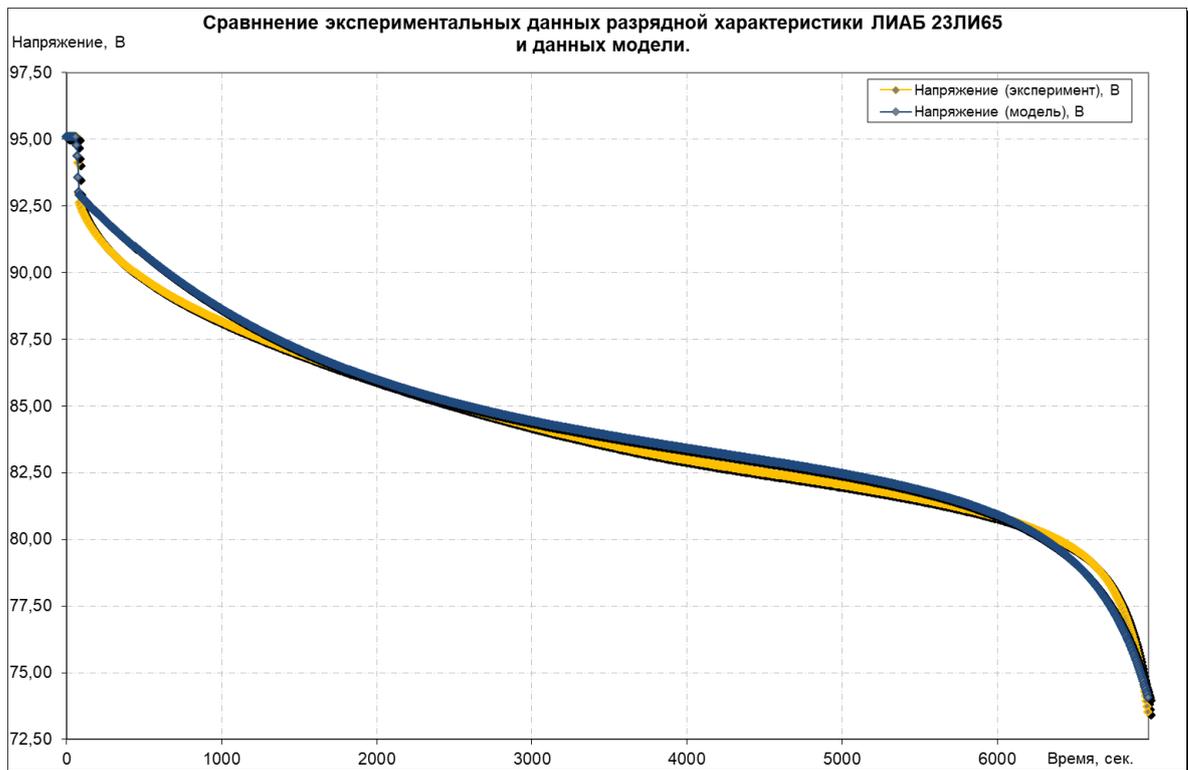


Рисунок 4.8 – Разрядная характеристика ЛИАБ 23ЛИ65 и модели

Отклонение 3 сигма ошибки нормального распределения случайной величины, вычисленное по измеренным и модельным значениям напряжения разрядной характеристики ЛИАБ, составляет 1,06 В (1,45 %).

Таким образом, в результате экспериментальных исследований подтверждена адекватность разработанной имитационной модели ЛИАБ с учетом масштабируемости модели как по количеству последовательно и параллельно соединенных аккумуляторов, так и по емкости аккумуляторов.

4.3 Испытания ЭПА и результаты подтверждения адекватности энергетической модели ЭПА экспериментальным данным

Для подтверждения адекватности энергетической модели ЭПА использованы результаты экспериментальных работ по оценке энергетической эффективности ЭПА. Экспериментальные исследования проводились в двух организациях: АО «НПЦ «Полюс» (г. Томск) и АО «ИСС» (г. Железногорск).

Электротехнический комплекс, предназначенный для испытаний ЭПА в части оценки энергетической эффективности ЭПА, воспроизводит структуру СЭП, в которой должна функционировать ЭПА в составе КА. Это означает, что к ЭПА должны быть подключены либо реальные образцы БС и АБ, либо их электрические имитаторы, а также соответствующая нагрузка. Применение реальных образцов БС и АБ для испытаний ЭПА обычно не осуществляется ввиду их высокой стоимости, а также снижения технологичности процесса испытаний в этом случае. Поэтому вместо реальных образцов БС и АБ применяются их электрические имитаторы.

В общем виде в состав электротехнического комплекса испытаний ЭПА входят: электрические имитаторы нагрузки, электрические имитаторы БС и АБ, а также система контроля и управления испытаниями. Описание одного из вариантов реализации электротехнического комплекса испытаний ЭПА приведено в работах [82, 83, 84].

При проведении испытаний реальных образцов ЭПА использовались имитаторы БС и АБ разработки НИИ АЭМ ТУСУР (г. Томск) из состава рабочих мест электрических испытаний КА и лаборатории испытаний СЭП АО «ИСС». Для испытаний использованы имитаторы БС (ИБС-200/7-4) и АБ (БИАБ-100ЛИ).

Функциональная схема испытаний на примере ЭПА простой структуры – регулятора напряжения понижающего типа – приведена на рисунке 4.9.

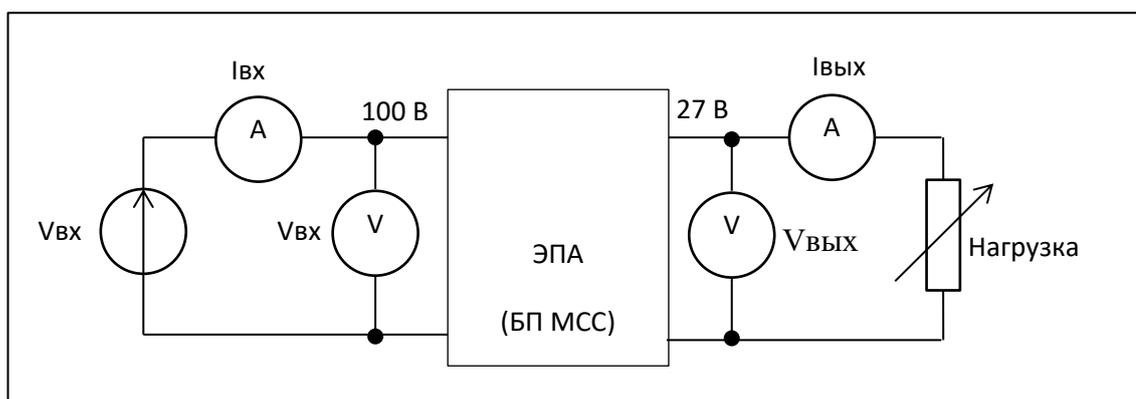


Рисунок 4.9 – Функциональная схема испытаний ЭПА (БП МСС)

Объектом исследования являлся образец стабилизатора напряжения понижающего типа «блок питания модуля служебных систем» (БП МСС), разработанный для использования в составе СЭП геостационарного КА, а также образцы ЭПА СЭП различного состава и с различной структурно-функциональной схемой, в составе которых применяются регуляторы напряжения последовательного понижающего типа, параллельного повышающего типа, зарядные и разрядные устройства АБ.

Энергетическая модель ЭПА применяется на полученном наборе экспериментальных данных (всего 103 точки) по энергетическим характеристикам БП МСС, которые измерены для следующих режимов и условий:

- диапазон выходной мощности с шагом ~ 30 Вт: $(30 \div 1.230)$, Вт;
- значения входного напряжения: $(99; 100; 101)$, В;
- значения температуры посадочной плиты: $(\text{минус } 32, \text{ н.у.}, +57)$, °С;
- давление: $(1,6 \times 10^{-8}; \text{ н.у.})$, Тор.

Результаты применения разработанной энергетической модели ЭПА иллюстрирует рисунок 4.10. На рисунке приведены графики следующих параметров:

$P_{\text{OUT изм}}$: точки измеренной выходной мощности, при соответствующей входной мощности ($P_{\text{IN изм}}$);

$P_{\text{OUT лин}}$: линия модельной выходной мощности;

КПД_{изм}: точки значений КПД, полученные стандартным образом, как соотношение $P_{OUT\text{ изм}}$ к $P_{IN\text{ изм}}$;

КПД_{лин}: линия значений КПД, полученная как соотношение $P_{OUT\text{ лин}}$ к $P_{IN\text{ изм}}$.

Примечание: для модельных значений также указаны планки погрешности по уровню ($\pm 3\sigma$) нормального распределения.

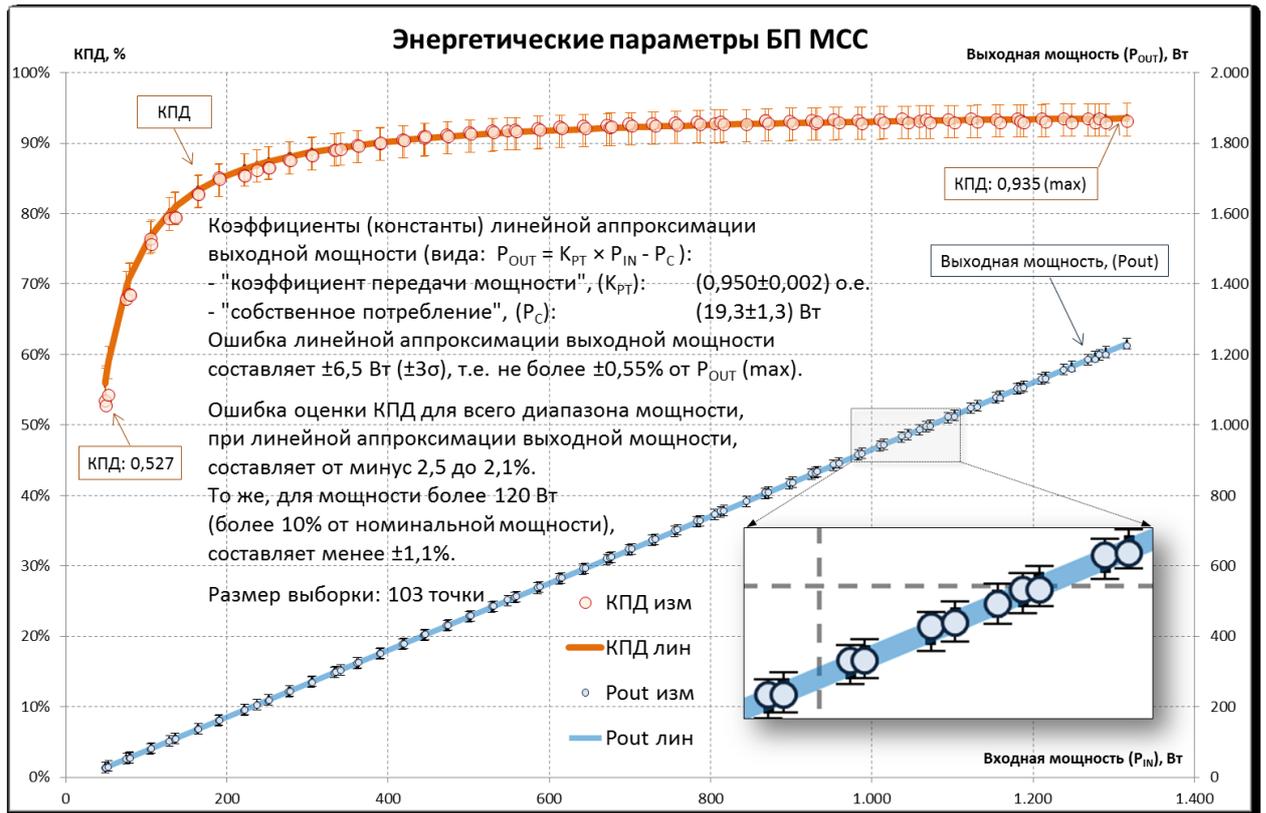


Рисунок 4.10 – Результат применения линейной энергетической модели ЭПА к БП МСС

Результаты проведенных испытаний показывают следующее.

- Характерный нелинейный вид зависимости параметра КПД от входной мощности. Значение параметра КПД в диапазоне входной мощности от ~ 50 до ~ 1320 Вт изменяется в диапазоне от 0,527 до 0,935 о.е.
- Линейная модель с параметрами КРМ и P_C хорошо описывает зависимость выходной мощности от входной мощности. Значение абсолютной ошибки по уровню $\pm 3\sigma$ между измеренными и модельными значениями выходной мощности не превышает $\pm 6,5$ Вт. Это составляет не более $\pm 0,55\%$ от уровня максимальной измеренной выходной мощности.

- Значения статистической погрешности определения в модели параметров КПМ и P_C находятся в достаточно узком диапазоне. Значения параметров с погрешностью по уровню $\pm 3\sigma$, составляют $(0,950 \pm 0,002)$ о.е. и $(19,3 \pm 1,3)$ Вт соответственно.
- Линия значений КПД, полученная с применением модельной зависимости выходной от входной мощности, удовлетворительным образом описывает точки значений КПД, полученные стандартным образом, с использованием измеренных значений выходной и входной мощностей. Абсолютные значения ошибки по уровню $\pm 3\sigma$ составляют от минус 0,025 до 0,021 о.е. А для рабочего диапазона выходной мощности – менее $(\pm 0,011)$ о.е. При этом значения параметра КПД изменяются в диапазоне от 0,527 до 0,935 о.е.

Таким образом, на базе реальных экспериментальных данных подтверждено следующее.

- Линейная модель энергетических характеристик БП МСС хорошо описывает полученные экспериментальные данные. Точность, обеспечиваемая моделью - ошибка менее $(\pm 0,55\%)$, более чем удовлетворяет стандартному критерию точности инженерных расчётов: ошибка должна быть не более $(\pm 3\%)$.
- Применение линейной модели с использованием параметров КПМ и P_C для описания энергетических параметров БП МСС с достаточной для инженерных анализов точностью эквивалентно применению стандартного параметра КПД.

Далее рассмотрены результаты применения линейной энергетической модели ЭПА для более сложных видов ЭПА различной структуры и различной схемотехнической реализации. В отличие от БП МСС, состоящего из одного силового устройства, рассмотренные далее образцы ЭПА состоят из четырёх взаимосвязанных силовых устройств: это шунтовой стабилизатор (либо последовательный понижающий стабилизатор – СН), стабилизатор напряжения на шине 27 В, зарядные и разрядные устройства.

Рассматриваемые ЭПА условно обозначены номерами от 1 до 4 и имеют различающиеся между собой схемы подключения преобразователей электроэнергии. Кроме того, ЭПА № 1 являются зарубежной разработкой, а ЭПА № 2, 3 и № 4 – разработкой отечественных производителей. Полученные с помощью разработанной методики значения КПМ и мощности собственного потребления ЭПА приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Значения КПМ узлов и мощности собственного потребления ЭПА

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

В таблице 4.7 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».

Точность (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. Точность (3σ) модельной оценки параметра P_C составляет от 6,5 до 65,1 Вт при значениях собственного потребления ЭПА 75...90 Вт для ЭПА средней мощности и 160...180 Вт для ЭПА большой мощности.

Относительная ошибка по мощности нагрузки, полученная в результате обработки экспериментальных данных с помощью разработанной линейной энергетической модели ЭПА, составляет не более 0,18 %.

Полученные параметры линейной аппроксимации зависимости параметров ЭПА используются следующим образом: при проведении энергетических расчётов виткового энергобаланса применяются значения КПМ, вычисленные как $(\text{КПМ} - 3\sigma)$, а значение собственного потребления ЭПА – $(P_C + 3\sigma)$.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований подтверждена адекватность энергетической модели ЭПА применяемой в составе разработанной имитационной модели СЭП геостационарного КА.

Оценка энергетической эффективности и идентификация параметров имитационной энергетической модели силовых модулей ЭПА осуществлялись путем испытаний модулей РУ, СН и ЗУ. Испытания проводились на производственной базе АО «НПЦ «Полюс» и АО «ИСС».

Результаты оценки параметров энергетической эффективности по данным испытаний модуля РУ, выполненного по схеме мостового резонансного конвертера, представлены на рисунке 4.11.

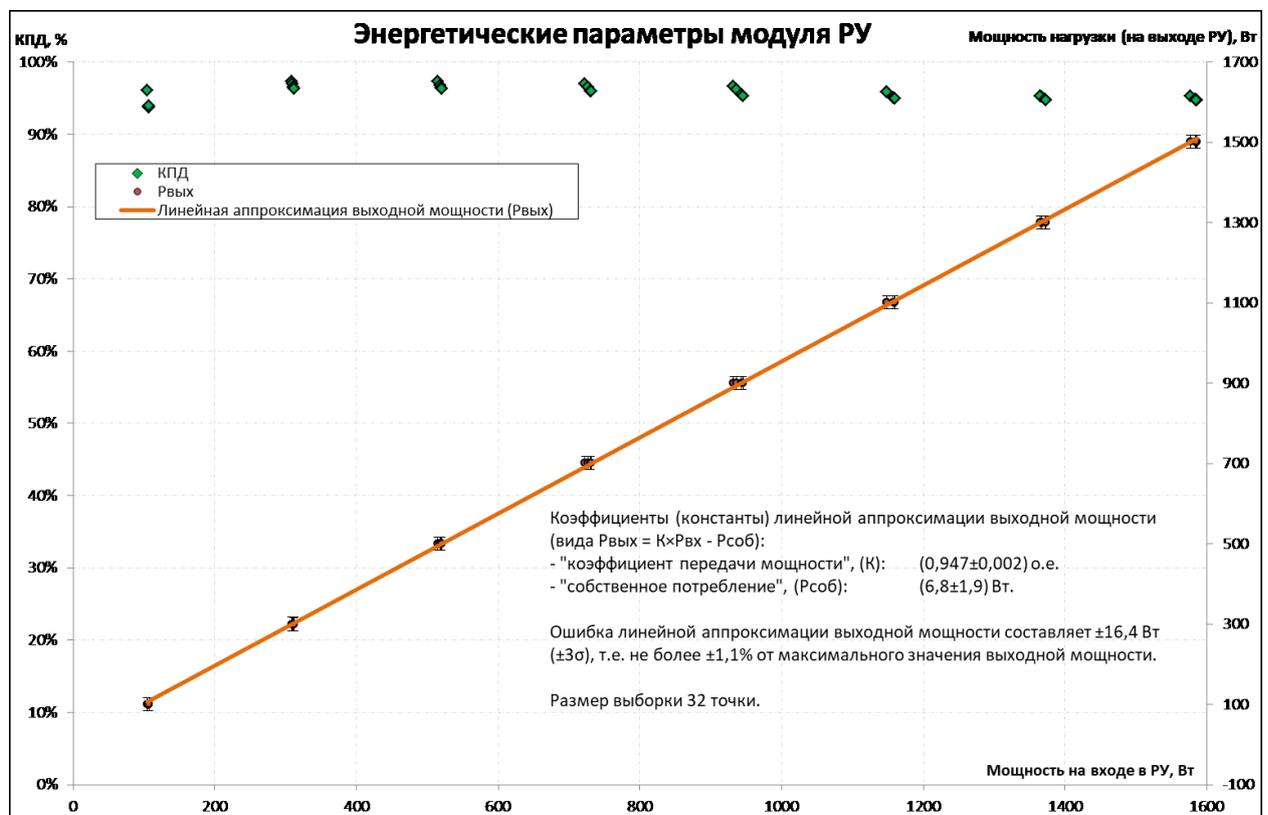


Рисунок 4.11 – Результаты оценки параметров энергетической эффективности модуля РУ по данным испытаний

Испытания модуля СН, выполненного по схеме мостового резонансного конвертера, проводились в АО «НПЦ «Полюс» в период с 2015 по 2020 гг. Испытаниям подвергались несколько модификаций опытных образцов модуля СН, отличающихся конструктивным исполнением, параметрами примененных ЭРИ и схемотехническими решениями. Всего испытано три образца:

- образец этапа технического проекта (ТП) разработки ЭПА (2015);
- образец этапа разработки конструкторской документации (КД) на ЭПА (2016);
- образец из состава опытной ЭПА, предназначенной для проведения автономных испытаний ЭПА (2016).

Результаты оценки параметров энергетической эффективности по данным испытаний модуля СН, выполненного по схеме мостового резонансного конвертера, представлены на рисунке 4.12.

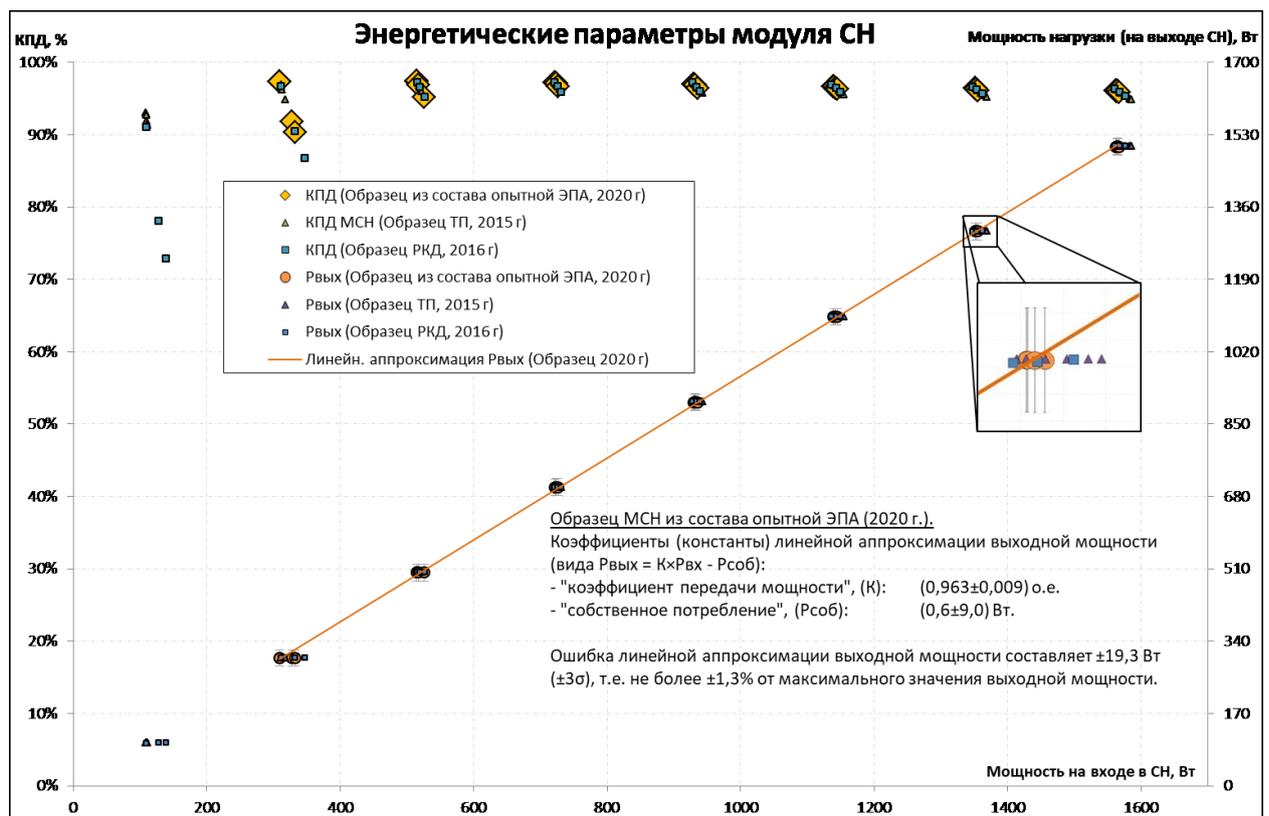


Рисунок 4.12 – Результаты оценки параметров энергетической эффективности модуля СН по данным испытаний

В качестве используемых для расчета параметров энергетической эффективности МСН приняты параметры, которые были получены по

результатам испытаний образца МСН из состава ЭПА для автономных испытаний в 2020 году.

В качестве используемых для расчета параметров энергетической эффективности МЗУ приняты параметры, которые были получены для образца ЭПА № 4 по таблице 4.7.

Идентифицированные по результатам анализа экспериментальных данных параметры энергетической эффективности ЭПА (МСН, МРУ, МЗУ) с достаточной для инженерных расчетов погрешностью описывают реальные параметры энергетической эффективности ЭПА (ошибка по выходной мощности по критерию 3σ не более 1,5%) и могут быть использованы в качестве параметров имитационной энергетической модели ЭПА.

4.4 Оценка адекватности результатов расчета оптимальных параметров СЭП геостационарного КА по экспериментальным данным

Адекватность расчета оптимальных параметров СЭП геостационарного КА подтверждается, в частности, результатами экспериментальных исследований реальных образцов составных частей прототипа рассматриваемой СЭП: БС, АБ, ЭПА и т.д. Вместе с тем представляется целесообразным провести сравнительный анализ полученных энергомассовых характеристик СЭП в зависимости от параметров межблочного силового электрического интерфейса с энергомассовыми характеристиками уже созданных СЭП.

Целью оценки адекватности расчета оптимальных параметров СЭП геостационарного КА по экспериментальным данным является подтверждение того, что выявленные тенденции изменения энергомассовых характеристик СЭП в зависимости от состава и конфигурации элементов СЭП не противоречат данным тенденциям изменения характеристик существующих СЭП геостационарных КА.

Сложность проведения такой оценки заключается в том, что ЭПА на базе мостовых резонансных конвертеров входит в состав СЭП, разработка которой еще не завершена [75]. Соответственно, опытные образцы СЭП геостационарных КА, которые строго соответствуют и по структуре, и по типу применяемого в составе СЭП оборудования, в настоящее время отсутствуют. Разработанные и эксплуатирующиеся в настоящее время образцы СЭП геостационарных КА, как правило, включают в себя ЭПА на базе секционированных шунтовых регуляторов мощности БС. Кроме того, относительно рассмотренных, отличаются удельные характеристики БС, АБ и ПКЗ АБ из состава СЭП.

По этим причинам значения энергомассовых характеристик опытных образцов СЭП геостационарных КА не будут совпадать со значениями энергомассовых характеристик СЭП, рассчитанных по модели.

Вместе с тем для подтверждения адекватности полученных расчетов оптимальных параметров СЭП должны как - минимум выполняться следующие условия:

1. Рассчитанный с помощью имитационной модели СЭП, где в качестве исходных данных используются характеристики реальных образцов СЭП, энергетический баланс должен быть положительным.

2. Качественно должна наблюдаться корреляция между значениями удельной выходной мощности реальных образцов СЭП и расчетными значениями удельной выходной мощности, которые будут получены в результате моделирования.

При проведении оценки адекватности расчета оптимальных параметров СЭП геостационарного КА по данным характеристик уже разработанных СЭП, необходимо учесть ряд допущений, а именно:

1. Для СЭП в составе которых применяется ЭПА с двумя выходными шинами (27 В и 100 В), в качестве значения выходной мощности СЭП используется сумма выходных мощностей по шинам 27 В и 100 В.

2. Структурная схема реальных образцов СЭП в имитационной модели СЭП геостационарного КА представляется в виде последовательно-параллельной схемы резонансных преобразователей с соответствующими им параметрами энергетической эффективности.

Экспериментальные данные в части характеристик реальных образцов СЭП геостационарных КА с учетом указанных выше допущений представлены в таблице 4.8.

В качестве исходных данных использованы данные по характеристикам СЭП геостационарных КА разработки АО «ИСС». В данных геостационарных КА применяются СЭП, разработанные АО «ИСС» для семейства универсальных платформ «Экспресс-1000» и «Экспресс-2000».

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета представлено в таблице 4.9.

Таблица 4.8 – Характеристики реальных СЭП геостационарных КА

Параметр	Значение					
	СЭП № 1 (Экспресс- 2000)	СЭП № 2 (Экспресс- 1000)	СЭП № 3 (Экспресс- 1000)	СЭП № 4 (ВЭО)	СЭП № 5 (Экспресс- 1000)	СЭП № 6 (Экспресс- 2000)
Мощность нагрузки, Вт.	14 700	6 740	6 740	11 000	7 700	14 700
Количество последовательно соединенных пакетов аккумуляторов, шт.	20	20	20	22	22	22
Количество аккумуляторов в пакете, шт.	4	2	2	2	1	2
Полная емкость одного аккумулятора в начале САС, А×ч	50	50	50	103	103	103
Количество АБ в комплекте, шт.	2	2	2	2	2	2
Масса одной АБ, кг	116	59	59	117,5	60	117,5
Количество последовательно соединенных ФП в БС, шт.	54	54	54	55	55	59
Количество параллельно соединенных ФП в БС, шт.	480	240	240	384	240	410
Масса БС, кг	142	67,4	66,6	113	73	115
Масса ЭПА, кг	85	49,2	49,2	36	33,5	84,8
Масса ПКЗ АБ, кг	12	12	12	10	10	12
Масса СЭП, кг	471	246,6	245,8	394	236	446
Удельная мощность СЭП, Вт/кг	31,2	27,3	27,4	27,9	32,6	32,96

Таблица 4.9 – Характеристики реальных образцов СЭП геостационарных КА в сравнении с данными моделирования

Параметр	Значение					
	СЭП № 1 (Экспресс-2000)	СЭП № 2 (Экспресс-1000)	СЭП № 3 (Экспресс-1000)	СЭП № 4 (ВЭО)	СЭП № 5 (Экспресс-1000)	СЭП № 6 (Экспресс-2000)
Мощность нагрузки, Вт	14 700	6740	6740	11000	7700	14700
Удельная мощность реальных СЭП, Вт/кг	31,2	27,3	27,4	27,9	32,6	32,96
Удельная мощность СЭП (модель, без БКС), Вт/кг	42	37,5	37,5	41,2	39,37	42,46
Удельная мощность СЭП (модель, с БКС), Вт/кг	37,9	34,1	34,1	37,5	35,9	38,7

Исходя из результатов моделирования, для образцов СЭП должны наблюдаться следующие закономерности в части зависимости удельной мощности от параметров СЭП.

1. При идентичной выходной мощности увеличение количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и фотопреобразователей в БС должно приводить к увеличению удельной выходной мощности СЭП.

2. Более мощные СЭП при идентичном количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и количестве последовательно соединенных ФП в БС должны иметь более высокую удельную мощность, чем менее мощные СЭП.

Анализ характеристик образцов СЭП и результатов моделирования, представленных в таблицах 4.8, 4.9, показывает, что указанные выше закономерности соблюдаются. Расчетные значения удельной мощности СЭП, полученные в результате моделирования, выше значений удельной мощности реальных СЭП по причине того, что в модели используются параметры перспективных образцов оборудования СЭП с повышенными относительно рассматриваемых образцов СЭП характеристиками. Гистограммы удельной мощности рассматриваемых образцов СЭП в сравнении с данными моделирования приведены на рисунке 4.12.

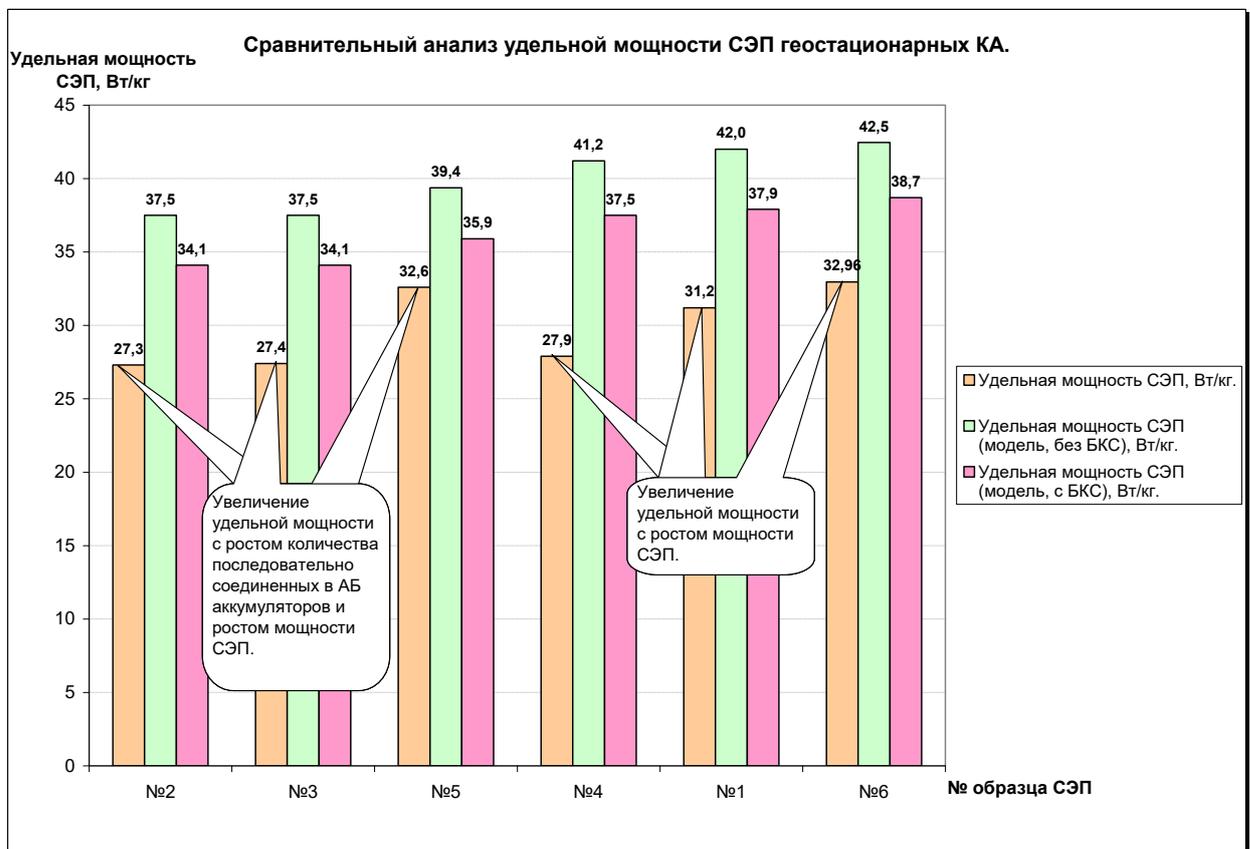


Рисунок 4.12 – Гистограммы удельной мощности реальных образцов СЭП в сравнении с данными моделирования

На гистограмме рисунка 4.12 видно, что наблюдается рост удельной мощности СЭП при росте значения максимальной выходной мощности СЭП и росте количества последовательно и параллельно соединенных аккумуляторов в АБ и ФП в БС. Наблюдается корреляция между характеристиками реальных образцов СЭП и данными моделирования. Коэффициент корреляции между удельной мощностью образцов СЭП № 1 и № 6 и модельными данными равен 1.

Коэффициент корреляции между удельной мощностью образцов СЭП № 2, № 3, №5 и модельными данными также равен 1. Коэффициент корреляции между удельной мощностью образцов СЭП № 1, 2, 3, 5, 6 и модельными данными составляет 0,82. Для оценки использован метод расчета коэффициента корреляции Спирмена [85]. Образец СЭП №4 в анализе не учитывается, поскольку данный образец разрабатывается для функционирования на высокоэллиптической орбите (ВЭО).

Реальные образцы СЭП геостационарных КА имеют достаточно ограниченный диапазон изменения параметров межблочного электрического интерфейса: ЭПА – БС и ЭПА – АБ. Параметры межблочного силового интерфейса СЭП определяются значением номинала выходного напряжения СЭП, т.е. значения рабочего диапазона напряжений БС и АБ выбираются наиболее близкими к значению выходного напряжения СЭП в обеспечение максимальной энергоэффективности СЭП. Количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и фотопреобразователей БС в реальных образцах не превышает 24 и 60 шт. соответственно. Поэтому оценку удельной мощности СЭП геостационарных КА во всем диапазоне рассмотренных значений напряжений БС и АБ (количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и фотопреобразователей в БС) провести невозможно.

Вместе с тем анализ экспериментальных данных в части подтверждения адекватности имитационной модели СЭП и сравнительный анализ энергомассовых характеристик опытных образцов СЭП и значений, получаемых в результате расчета, показывают адекватность проведенной оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА.

Внешний вид опытных образцов составных частей СЭП, результаты испытаний которых использованы для подтверждения адекватности имитационной модели СЭП и адекватности оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА, представлен на рисунке 4.13.

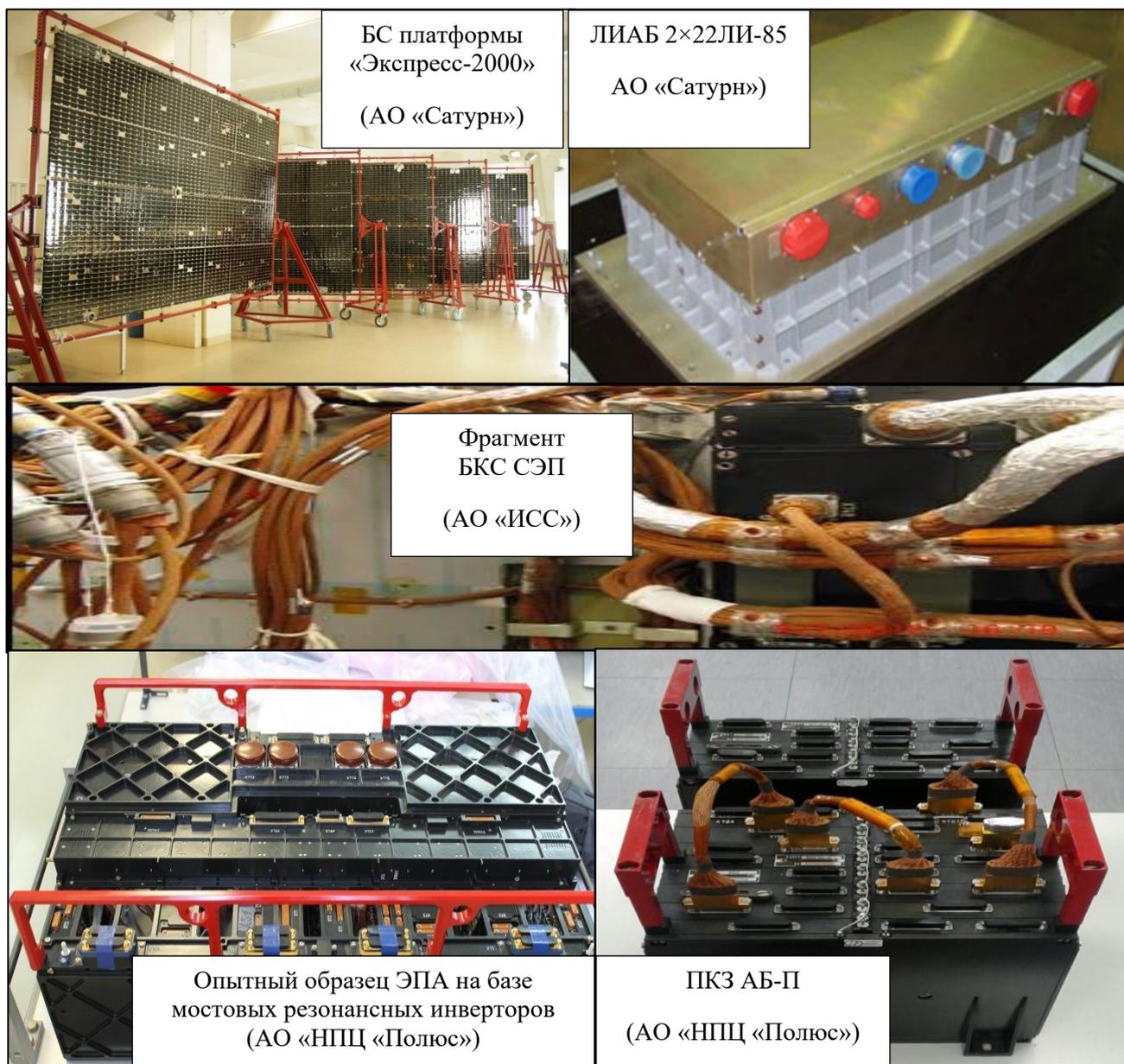


Рисунок 4.13 – внешний вид опытных образцов составных частей СЭП

На рисунке 4.13 представлены опытно-промышленные образцы БС, АБ, ПКЗ АБ, модуль ЭПА и БКС СЭП. Указанные образцы составных частей СЭП являются либо штатными изделиями, предназначенными для эксплуатации в составе СЭП геостационарных КА (БС, АБ, ПКЗ АБ, БКС), либо опытными образцами этапа наземной экспериментальной отработки, изготовленными при проведении опытно-конструкторских работ (ЭПА). Это подтверждает высокую степень достоверности используемых исходных данных и полученных результатов в части количественных оценок параметров оборудования СЭП и результатов оптимизации ее характеристик.

4.5 Выводы

Экспериментальные исследования образцов составных частей СЭП, проведенные в производственных условиях предприятий АО «ИСС», АО «НПЦ «Полюс» и АО «Сатурн», обеспечили возможность подтверждения адекватности разработанной имитационной модели СЭП.

Используемые промышленные образцы составных частей СЭП являются наиболее близкими оборудованию СЭП геостационарного КА рассмотренной структуры и состава и могут быть использованы как прототип для создания СЭП геостационарного КА с оптимальными энергомассовыми характеристиками.

Методика проведения экспериментальных исследований основана на применении оборудования и процедур контроля и испытаний составных частей СЭП в процессе их наземной экспериментальной отработки и изготовления, что гарантирует достоверность полученных результатов.

Проведенный анализ адекватности результатов расчета оптимальных параметров СЭП геостационарного КА с использованием характеристик образцов СЭП геостационарных КА убедительно подтверждает достоверность полученных результатов оптимизации.

Заключение

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

1. Предложенная модульная структура СЭП позволяет реализовать гальваническую развязку БС и АБ от полезной нагрузки космического аппарата и обеспечить повышение энергомассовых характеристик за счет изменения рабочих диапазонов напряжений АБ и БС для заданной мощности системы электропитания.
2. Разработанная методика оценки энергетической эффективности ЭПА СЭП обеспечивает определение с заданной погрешностью (до 1,5 %) параметров энергетической эффективности ЭПА различной структуры и типов силовых преобразователей при расчете энергетического баланса КА.
3. Созданная имитационная модель СЭП обеспечивает расчет энергетического баланса КА и оптимизацию энергомассовых характеристик СЭП предложенной структуры и типа силовых преобразователей ЭПА для статических режимов работы полезной нагрузки аппарата. Максимальное различие теоретических и экспериментальных результатов расчета составляет не более 3%.
4. Разработанная методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП позволяет аргументировано сформулировать требования к СЭП предложенной структуры и типа силовых преобразователей ЭПА и обеспечить достижение максимальной удельной мощности в заданном допустимом диапазоне изменения количества последовательно соединенных ФП в БС и аккумуляторов в АБ.
5. Методика оптимизации улучшает удельные характеристики СЭП, примерно на 3÷4 %, значительно сокращает временные затраты на начальных стадиях проектирования новых геостационарных КА, создаваемых в ОАО «ИСС» по ряду федеральных программ. Планируемый срок достижения практического эффекта

от результатов оптимизации СЭП при разработке конструкторской документации – 2023÷2025 гг. и при создании опытных образцов оборудования – 2025÷2027 гг.

6. Ожидаемый 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-AM5» мощностью 13 кВт.

Перечень терминов, сокращений и обозначений

Термины, применяемые в описании конструкции БС:

«Фотопреобразователь» (ФП) – полупроводниковая арсенид-галлиевая структура с приваренными к лицевым и тыльным контактам коммутационными и диодными шинами, с наклеенной на лицевую поверхность стеклянной пластиной и стеклотекстолитовой платой на тыльной поверхности;

«Секция» – несколько фотоэлементов, электрически соединенных последовательно;

«Элементарный генератор» (ЭГ) – электрически соединенные последовательно секции с блокирующим устройством, обеспечивающие рабочее напряжение БС. Каждый ЭГ, как правило, состоит из 59-60 последовательно соединенных ФП;

«Модуль БС» – сборочная единица, конструктивно обеспечивающая объединение секций и монтаж их струнным каркасе СБ;

«Генератор G» (панель) – 41 (34) элементарных генератора для ГСО, установленных на одной панели и электрически соединенных параллельно;

«Батарея солнечная» (БС) – необходимое количество генераторов G (панели) с выходными соединителями, установленными на каждую панель, соединенную с КА шарнирами с пружинами для раскрытия, с узлами зачеховки и механизмами раскрытия.

Сокращения и обозначения

АБ – аккумуляторная батарея;

БП МСС – блок питания модуля служебных систем;

БС – батарея солнечная;

ДУ – двигательная установка космического аппарата;

ЗУ – зарядное устройство;

КА – космический аппарат;

КПД – коэффициент полезного действия;

КПМ – коэффициент передачи мощности;

ЛИА – литий-ионный аккумулятор;

ЛИАБ – литий-ионная аккумуляторная батарея;

РАСО – режим аппаратной солнечной ориентации;

РНБС – регулятор напряжения батареи солнечной;

РУ – разрядное устройство;

САС – срок активного существования;

СН – стабилизатор напряжения;

СЭП – система электропитания;

ТУЗ – теневой участок Земли;

ШИМ – широтно-импульсная модуляция;

ШС – шунтовой стабилизатор напряжения;

ЭВМ – электронно-вычислительная машина;

ЭГ - элементарный генератор;

ЭПА – энергопреобразующая аппаратура;

ЭРД – электрореактивный двигатель;

ЭРМ – экстремальный регулятор мощности солнечной батареи;

Литература

1. Mukund R. Patel Spacecraft power systems / R. Patel Mukund. -Florida: CRC Press, 2005. -691 p.: ill.
2. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин, В. И. Иванчура, А. И. Чернышев, Ш. Н. Исляев. Новосибирск : ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1994. 318 с.
3. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению : пер. с англ. М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2008. 272 с. : ил. (Серия «Силовая электроника»).
4. Бортовые системы электропитания информационных искусственных спутников Земли: опыт 35-летнего сотрудничества ОАО «ИСС» и ОАО «НПЦ «Полюс» / С. Г. Кочура, В. С. Кудряшов, М. В. Нестеришин, В. В. Хартов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сборник науч. тр. Томск : Изд-во НТЛ, 2011. 612 с.
5. O'Sullivan D., Weinberg A. The Sequential Switching Shunt Regulator (S3R) // Proceeding of SPCS. 1977.
6. Olsson D. EPC mass and efficiency improvement // SPACE TWTA workshop. 1994.
7. Castiaux J. P., Bury P., Liegeois B. Power conditioning units for high power geostationary satellites // PESC. 97.
8. Picard G., Michoud V. Behavioural modelling of the SPACEBUS 3000 Conditioning Unit. Proceedings of ESPC. 1995.
9. Bouhours G., Asplanato R. Power Subsystem for 20 kW Telecommunication Satellites // Proceedings of the Fifth European Space Power Conference (ESPC). Tarragona, Spain, 21-25 September 1998 / organised by European Space Agency [ESA] ...

10. Garrigos A., Carrasco J. A., Blanes J. M. and Sanchis-Kilders. A power conditioning unit for high power GEO satellites based on the sequential switching shunt series regulator // MELECON. 2006 – 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Malaga, Spain, 2006. P. 1186-1189, doi: 10.1109/MELCON.2006.1653313.
11. Алатов И. В. Многомодульный импульсный стабилизатор напряжения при питании от источника тока : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2005.
12. Патент РФ № 2238583. Способ управления импульсным стабилизатором / Краснобаев Ю. В., Алатов И. В., Вторушин Ю. А., Мамлин Б. Н. Опубл. 20.10.2004. Бюл. № 29.
13. Li X., Bhat A.K.S. Analysis and Design of High-Frequency Isolated Dual-Bridge Series Resonant DC/DC Converter // IEEE Transactions on Power Electronics. 2010. Vol. 25, no. 4. P. 850–862. doi: 10.1109/TPEL.2009.2034662.
14. Chen W., Rong P., Lu. Snubberless Bidirectional DC–DC Converter With New CLLC Resonant Tank Featuring Minimized Switching Loss // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2010. Vol. 57, no. 9. P. 3075-3086. doi: 10.1109/TIE.2009.2037099.
15. Zhao B., Song Q., Liu. Power Characterization of Isolated Bidirectional Dual-Active-Bridge DC–DC Converter With Dual-Phase-Shift Control // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27, no. 9. P. 4172–4176, doi: 10.1109/TPEL.2012.2189586.
16. Basic families of medium-power soft-switched isolated bidirectional dc-dc converters / H. R. Karshenas, H. Daneshpajoo, A. Safaei, A. Bakhshai and P. Jain // Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC). 2nd ed. Tehran, 2011. P. 92-97. doi: 10.1109/PEDSTC.2011.5742504.
17. Design Methodology of Bidirectional CLLC Resonant Converter for High-Frequency Isolation of DC Distribution Systems / J. H. Jung, H. S. Kim, M. H. Ryu and J. W. Baek // IEEE Transactions on Power Electronics. 2013. Vol. 28, no. 4. P. 1741-1755. doi: 10.1109/TPEL.2012.2213346.

18. Zhao B., Yu Q., Sun W. Extended-Phase-Shift Control of Isolated Bidirectional DC–DC Converter for Power Distribution in Microgrid // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. Vol. 27, no. 11. P. 4667-4680. doi: 10.1109/TPEL.2011.2180928.
19. Wei Chen, Zhengyu Lu. Investigation on topology for Type-4 LLC resonant Dc-Dc converter // IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes. 2008. P. 1421-1425. doi: 10.1109/PESC.2008.4592134.
20. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых инверторов тока / А. В. Осипов, Ю. А. Шиняков, А. И. Отто, М. М. Черная, А. А. Ткаченко // Известия ТПУ. 2014. № 4.
21. Горяшин Н. Н. Квазирезонансный стабилизатор напряжения : дис. ... канд. техн. наук / Сиб. гос. технол. ун-т. Красноярск, 2005.
22. Черная М. М. Исследование и разработка энергопреобразующей аппаратуры высоковольтных систем электропитания космических аппаратов [Электронный ресурс] : дис. ... канд. техн. наук. Томск : ТУСУР, 2017. URL: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/5dgeyc1q> (дата обращения: 11.12.2020).
23. Кочура С. Г., Нестеришин М. В., Козлов Р.В. и др. Система электропитания нового поколения // Третий азиатский симпозиум по инженерии и информатике. Китай, г. Ченду, 22-25.04.2015.
24. Борисенко В. Ю., Козлов Р. В., Тараканов К. В. Энергопреобразующая аппаратура нового поколения // Электронные и электромеханические системы и устройства : материалы XIX науч.-техн. конф. (Томск, 16-17 апр. 2015 г.) / АО «НПЦ «Полюс». Томск, 2015. 360 с.
25. Борисенко В. Ю., Козлов Р. В., Тараканов К. В. Энергопреобразующая аппаратура нового поколения // Электронные и электромеханические системы и устройства : сборник научных трудов. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2016. 512 с.

26. Кудряшов В. С., Эльман В. О., Козлов Р. В. и др. Система электропитания космического аппарата. Патент на изобретение RU 2396666 С1. Опубл. 10.08.2010. Бюл. № 22.
27. Система электропитания космических аппаратов. Патент на изобретение RU 2680245 С1 / К. Г. Гордеев, С. Г. Кочура, Р. В. Козлов, М. В. Нестеришин, С. П. Опубл. 19.02.2019. Бюл. № 5.
28. Система электропитания космического аппарата. Патент на изобретение RU 2699084 С1 / В. В. Коротких, Р. В. Козлов, М. В. Нестеришин, С. И. Опенько. Опубл. 03.09.2019. Бюл. № 25.
29. Система электропитания космического аппарата с экстремальным регулированием мощности солнечной батареи. Патент на изобретение RU 2560720 С1 / А. В. Осипов, Ю. А. Шиняков, С. Б. Сунцов, В. Н. Школьный, М. В. Нестеришин, М. М. Черная, А. И. Отто. Опубл. 20.08.2015. Бюл. № 23.
30. Лукьяненко М. В. и др. Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов : монография / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 176 с.
31. Нестеришин М. В., Стадухин Н. В., Крючков П. А. Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». 2017. С. 476-483.
32. Spacecraft Systems Engineering. 4th ed. NY : Wiley, 2011.
33. Handbook of Space Technology Edited by Wilfried Ley, Klaus Wittmann and Willi Hallmann © 2009 John Wiley & Sons, Ltd.
34. Asif Samina. Evolutionary computation based multi-objective design search and optimization of spacecraft electrical power subsystems. PhD thesis, University of Glasgow, 2008.
35. Подиновский В. В., Ногин В. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М. : Наука, 1982, 2007.

36. Нестеришин М. В., Стадухин Н. В., Крючков П. А. Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». 2017. С. 476–483.
37. Paul Bauer. Computer Simulation of Satellite Electric Power Systems // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1969. Vol. AES-5, iss. 6. P. 934–942.
38. Nelms R. M., Grigsby L. L. Simulation of DC spacecraft power systems // IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems. 1989. Vol. 25. P. 90-95. 10.1109/7.18665.
39. Среда программного моделирования спутников наземного отладочного комплекса – БИВК. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017617953, 18.07.2017 / М. В. Тимисков, О. А. Вязовецкова, А. А. Колташев, Г. Н. Кучеренко, С. С. Корытин, Е. И. Карманова. Заявка № 2016662520 от 18.11.2016.
40. Wootaik Lee. Modelling and simulation of vehicle electric power system / Wootaik Lee, Daeho Choi, Myoungho Sunwoo, Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdong-gu, Seoul 133-791, South Korea, Received 5 September 2001; accepted 11 January 2002.
41. Zhenhua Jiang. Application of VTB in design and testing of satellite electrical power systems / Zhenhua Jiang, Roger A. Dougal, Shengyi Liu; Department of Electrical Engineering, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA Received 3 February 2003; accepted 10 February 2003.
42. Virtual test bed for advanced power sources / R. A. Dougal, S. Liu, L. Gao, M. Blackwelder ; Department of Electrical Engineering, University of South Carolina, Columbia, SC 29208, USA.
43. Diaz E. O., Caudepon J. I., Alia S. Satellite's Energy Balance, Modelling and Sizing Tool with Ecosimpro // European Space Power Conference, ESPC 2019.

44. LI Fan. Simulation of Uniform Bus Alignment Satellite Power System / LI Fan, LI Yanjia, Zhao Jianhui, Yang Xinlin. School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, China, 100083.
45. Bailey P., Gibbs C., Armantrout J. Advanced EPS component models for accurate satellite EPS simulation // 7th International Energy Conversion Engineering Conference. 2009. статья № 2009-4614.
46. Bailey P. G., Armantrout J. EPS sensitivity studies using the PTS simulation code for specific satellite applications (2008) // 6th International Energy Conversion Engineering Conference, IECEC. 2008. статья № 2008-5615.
47. Modeling and Design of Electrical Power Subsystem for CubeSats / S. Acharya, F. Alshehhi, A. Tsoupos et al. // SEST 2019 - 2nd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies. 2019. статья № 8849042.
48. Li F., Li Y., Zhao J., Yang X. Simulation of uniform bus alignment satellite power system // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2008. 7128. статья № 71282M.
49. Power sizing and power performance simulation tools for general EPS mission analyses / C. Gibbs, P. Bailey, R. Hollandsworth, J. Armantrout // Collection of Technical Papers - 2nd International Energy Conversion Engineering Conference. 2004. Vol. 1. P. 268-276.
50. Sher A., Baig M. S. Design and Simulation of Small Satellite Power System in Simulink/ Matlab for Preliminary Performance Estimation // Proceedings of 2019 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST. 2019. P. 359-365.
51. Имитационная модель контроллера солнечной батареи / С. С. Пост, О. А. Донцов, В. И. Иванчура, Ю. В. Краснобаев // Известия Томского политехнического университета. 2014. Т. 325, № 4. С. 111-120.

52. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей : пер. с англ. М. : Энергоатомиздат, 1983.
53. Кузоро В. И., Шанаврин В. С., Маренина Е. Н. Солнечные батареи АО «ИСС» // Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / Акционерное общество «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина». 2017. С. 518-523.
54. Подложка панели солнечной батареи и способ ее изготовления. Патент №2449226. 2012 / В. И. Кузоро, В. В. Миронович, Н. А. Шамова, В. И. Халиманович.
55. 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. Т. 18, № 12. С. 81-84.
56. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach // Energies. 2011. № 4. P. 582–598.
57. Rahmoun A., Biechl H. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams // Przegląd elektrotechniczny. 2012. № 7b. P. 152–156.
58. An approach for state of charge estimation of Li-ion battery based on Thevenin equivalent circuit model / B. Chen, H. Ma, H. Fang, Fan H. et al. // Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2014 Hunan). 2014.
59. Xiaoqiang Zhang, Xiaocheng Wang, Weiping Zhang, and Geyang Lei. A Simplified Li-ion Battery SOC Estimating Method // Transactions on electrical and electronic materials. 2016. Vol. 17, No. 1. P. 13-17.
60. Chang W. Y. State of charge estimation for LiFePO₄ battery using artificial neural network // International Review of Electrical Engineering. 2012. Vol. 7, № 5. P. 5874–5800.

61. He W., Huang D., Feng D. Prediction of SOC of lithium batteries and varied pulse charge // Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA '09). Changchun. 2009. P. 1578–1582.
62. Лелеков А. Т., Сахнов М. Ю., Лелеков Е. Т. Структурная модель литий-ионного аккумулятора с нелинейностями на основе нечетко-логических систем // Фундаментальные проблемы преобразования энергии в литиевых электрохимических системах : материалы XII Междунар. конф. / Кубанский гос. университет. Краснодар, 2012. С. 213–214.
63. He H., Xiong R., Fan J. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach // Energies. 2011. № 4. P. 582–598.
64. Yuan S., Wu H., Yin C. State of Charge Estimation Using the Extended Kalman Filter for Battery Management Systems Based on the ARX Battery Model // Energies. 2013. № 6. P. 444–470.
65. Tremblay O., Dessaint L.A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // World Electric Vehicle Journal. 2010. Vol. 3. P. 1–10.
66. Брянцев А. А., Букреев В. Г. Алгоритм определения параметров модели Шеферда для построения имитатора литий-ионного аккумулятора // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 1. С. 95–99.
67. Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / М. В. Нестеришин, В. Г. Букреев, Р. В. Козлов, А. В. Журавлев // Доклады Томского гос. университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Т. 21, № 1. С. 112–118.
68. Дьяконов В. П. Simulink 5/6/7 : самоучитель. М. : ДМК-Пресс, 2008. 784 с. : ил.
69. Шиняков Ю. А. Экстремальное регулирование мощности солнечных батарей автоматических космических аппаратов // Вестник Самарского гос.

аэрокосмич. университета им. академика С.П. Королёва. 2007. № 1 (12). С. 123-129.

70. 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 гос. университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Том 21, № 3. С. 98-102.

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

72. Васильев И. С., Ким В. С., Ефремов С. В. Надежность электрических соединений в бортовой кабельной сети перспективных космических аппаратов / Науковедение : интернет-журнал. 2013. № 3(16). С. 54.

73. Литий-ионные аккумуляторы космического назначения, основные направления работ и полученные результаты / С. Д. Лихоносов, В. А. Попов, В. П. Кулыга и др. // Автономная энергетика. 2014. № 32. С. 39–46.

74. Литий-ионные аккумуляторные батареи [Электронный ресурс]. URL.: <https://saturn-kuban.ru/produktsiya/akkumulyatornye-batarei/litiy-ionnye-akkumulyatornye-batarei/> (дата обращения: 01.01.2020).

75. Столяров А. Н., Полин Д. И. Модуль разрядного устройства на основе резонансного преобразователя с повышенным КПД в широком диапазоне входных напряжений // Электронные и электромеханические системы и устройства : тез. докладов XX науч.-техн. конф. (16–17 апр. 2020 г., Томск) / АО «НПЦ «Полюс». Томск, 2020. С. 37-40.

76. Бубнов О. В. И и др. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата // Доклады ТУСУР. 2017. Т. 20, № 3. С. 35–39. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-3-35-39.

77. Система электропитания космических аппаратов. Патент на изобретение RU 2680245 C1 / К. Г. Гордеев, С. Г. Кочура, Р. В. Козлов, М. В. Нестеришин, С. П. Черданцев. Оpubл.: 19.02.2019. Бюл. № 5.
78. Нагайкин А. С. и др. Установка для контроля параметров фотоэлектрических преобразователей. Патент на изобретение RU 2352953 C1. Опубликовано: 20.04.2009. Бюл. № 11.
79. Triple Junction Solar Cell 3G30C. Data Sheet [Электронный ресурс]. URL: <http://www.azurspace.com/index.php/en/products/products-space/space-solar-cells/> (дата обращения: 01.06.2018).
80. Сухарев Н. В. Развитие зарядно-разрядного программно-аппаратного комплекса, применяемого для проверки аккумуляторных батарей космических аппаратов // Евразийский союз ученых. 2020. no. 5-5 (74). P. 67-71.
81. Nelder J. A., Mead R. Computer Journal. 1965. Vol. 7. P. 308–313.
82. Тютюнин Т. В., Прокофьев Е. Н. Технология и средства испытаний системы электропитания космических аппаратов // I-methods. 2009. Vol. 1, no. 1. P. 10-13.
83. Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры систем электропитания космических аппаратов / Ю. А. Кремзуков, В. М. Рулевский, Ю. А. Шиняков, М. Н. // Доклады Томского гос. университета систем управления и радиоэлектроники. 2010. no. 2-2 (22). P. 274-280.
84. Казанцев Ю. М., Кремзуков Ю. А. Автоматизированная система контроля энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2009. Vol. 314, no. 4.
85. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика : учеб. пособие для вузов. 10-е изд., стереотип. М. : Высшая школа, 2004. 479 с.
86. Козлов Р. В., Букреев В. Г., Лелеков А. Т. Методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного

космического аппарата // Доклады Томского гос. университета систем управления и радиоэлектроники. 2021. Т. 24, № 1. С. 83-90.

87. 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. P. 340-345. статья № 9153514.

Приложение А – Копии патентов
и свидетельства на программный продукт.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2396666

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА

Патентообладатель(ли): *Открытое акционерное общество
"Информационные спутниковые системы" имени академика
М.Ф. Решетнёва" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2009124704

Приоритет изобретения **29 июня 2009 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **10 августа 2010 г.**

Срок действия патента истекает **29 июня 2029 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2680245

Система электропитания космического аппарата

Патентообладатель: *Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по космической деятельности "Роскосмос" (RU)*

Авторы: *Гордеев Константин Георгиевич (RU), Кочура Сергей Григорьевич (RU), Козлов Роман Викторович (RU), Нестершин Михаил Владленович (RU), Черданцев Сергей Петрович (RU)*

Заявка № 2018118203

Приоритет изобретения 17 мая 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 19 февраля 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 17 мая 2038 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ившин

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2699084

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА

Патентообладатель: *Российская федерация, от имени которой
выступает Министерство обороны Российской Федерации
(RU)*

Авторы: *Коротких Виктор Владимирович (RU), Козлов Роман
Викторович (RU), Нестеришин Михаил Владленович (RU),
Опенько Сергей Иванович (RU)*

Заявка № 2018128893

Приоритет изобретения 06 августа 2018 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 03 сентября 2019 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 06 августа 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020613088

**Имитационная модель системы электропитания
космического аппарата в статическом режиме работы**Правообладатель: *Акционерное общество «Информационные
спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (RU)*Автор: *Козлов Роман Викторович (RU)*

Заявка № 2020612220

Дата поступления 27 февраля 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 10 марта 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

Приложение Б – Акты внедрения



Акционерное общество
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени академика М.Ф. Решетнёва»



ул. Ленина, д. 52, г. Железнодорожный, ЗАТО Железнодорожный, Красноярский край, Российская Федерация, 662972
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http: //www.iss-reshetnev.ru
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель генерального
конструктора по электрическому
проектированию и системам
управления КА АО «ИСС»



С. Г. Кочура

2021 г.

АКТ о внедрении результатов диссертационной работы Козлова Романа Викторовича.

Настоящим актом подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы Козлова Романа Викторовича «Оптимизация энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата» на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются на предприятии АО «ИСС».

1. Предложенная в работе структура СЭП КА с применением в качестве силовых преобразователей ЭПА мостовых резонансных инверторов с гальванической трансформаторной развязкой БС и АБ от нагрузки используется в ряде проектов при разработке схемотехнических решений системы электропитания на отечественных элементах;
2. Созданная методика оценки энергетической эффективности ЭПА различной структуры и типа силовых преобразователей применяется для расчета энергетического баланса при проектировании СЭП КА;



3. Рассчитанные параметры СЭП геостационарного КА с оптимальными энергомассовыми характеристиками для нескольких значений требуемой выходной мощности системы электропитания признаются обоснованными и целесообразными для проектирования новых СЭП с ЭПА предложенной структурной схемы;
4. Ожидаемый экономический эффект в результате улучшения энергомассовых характеристик СЭП может составить до 300...450 млн. р. для одного космического аппарата тяжелого класса (повышение удельной мощности СЭП на 4,9 % обеспечивает возможность введения дополнительно как-минимум одного транспондера полезной нагрузки).

Главный конструктор
электрического
проектирования и испытаний
КА АО «ИСС»

С. И. Опенько

Начальник отдела разработки
бортовых систем
электропитания КА АО «ИСС»

М. В. Нестеров



Директор Инженерной школы энергетики, к.т.н., доцент

УТВЕРЖДАЮ

А.С. Матвеев

АКТ

использования результатов диссертационной работы
Козлова Романа Викторовича на тему «**Оптимизация энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата**» в учебном процессе Национального исследовательского Томского политехнического университета

Подтверждаем, что результаты диссертационных исследований Козлова Романа Викторовича, начальника сектора отдела разработки бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева, используются в учебном процессе подготовки студентов отделения электроэнергетики и электротехники Инженерной школы энергетики ТПУ.

В процессе выполнения диссертационной работы созданы новые структуры, модели системы электропитания и методика оптимизации ее энергомассовых характеристик, основанная на варьируемом количестве литий-ионных аккумуляторов и фотоприемников солнечной батареи. Материалы диссертации используются в лекционных материалах при подготовке бакалавров направления «Электроэнергетика и электротехника» и магистров по программе «Электромеханические системы автономных объектов и автоматизированный электропривод», а также в выпускных квалификационных работах студентов и аспирантов.

И.о. руководителя отделения электроэнергетики и электротехники, к.т.н., доцент

Ивашутенко А.С.

Профессор Инженерной школы энергетики, д.т.н., профессор

Букреев В.Г.