

УДК 629.78.064.5, 621.311.6

Р.В. Козлов, В.Г. Букреев, А.Т. Лелеков

Методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания геостационарного космического аппарата

Предлагается методика оптимизации энергомассовых характеристик системы электропитания (СЭП) геостационарного космического аппарата (КА) на основе критерия выходной удельной мощности. Рассматривается СЭП с энергопреобразующей аппаратурой, содержащей в своем составе мостовые квазирезонансные преобразователи с гальванической развязкой. Приведены результаты оценки энергетической эффективности таких силовых преобразователей при различных диапазонах значений входных напряжений. При оптимизации критерия удельной мощности СЭП учитываются условия положительного энергетического баланса космического аппарата. Отражены результаты оптимизации энергомассовых характеристик СЭП рассмотренной структуры и состава для мощности полезной нагрузки КА на 6 и 13 кВт.

Ключевые слова: система электропитания космического аппарата, имитационная модель, удельная мощность, оптимизация энергомассовых характеристик.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-83-90

Одной из основных задач, которая решается при проектировании систем и устройств геостационарных космических аппаратов, является задача повышения энергомассовых характеристик систем электропитания. Решение данной задачи для геостационарных КА особенно актуально, поскольку стоимость вывода аппарата на орбиту (например, 36 тыс. км) имеет максимальное значение по сравнению с более низкими орбитами [1]. Кроме того, в отличие от низкоорбитальных КА, которые имеют различный и резко переменный график работы полезной нагрузки, геостационарные аппараты предназначены, в основном, для осуществления услуг связи и ретрансляции, т.е. имеют постоянную мощность нагрузки. Это дает возможность рассматривать геостационарные КА как класс, для которого возможно разработать универсальные решения в части повышения энергомассовых характеристик СЭП.

В состав оборудования современных СЭП геостационарных КА входят: солнечная батарея (СБ), комплект литий-ионных аккумуляторных батарей (АБ), энергопреобразующая аппаратура (ЭПА) в составе зарядного (ЗУ) и разрядного (РУ) устройств, а также стабилизатора выходного напряжения (СН), прибор контроля и защиты АБ (ПКЗ АБ). Обобщенная структурно-функциональная схема СЭП современных геостационарных КА представлена на рис. 1.

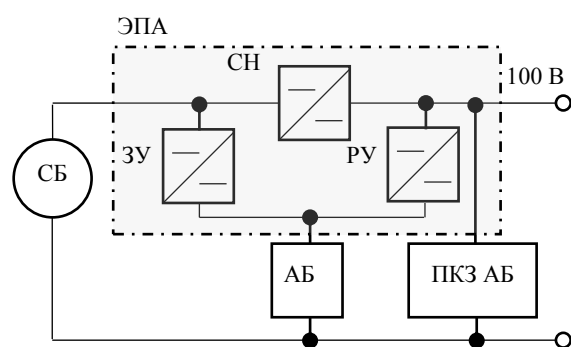


Рис. 1. Структурно-функциональная схема СЭП

Главным показателем эффективности СЭП является её удельная мощность (при сохранении остальных показателей), максимизировать которую можно различными способами – оптимизируя характеристики элементов СЭП, её структуру или режимы её работы. Например, в статье [2] максимизируются характеристики СБ геостационарного КА путём подбора количества последовательно и параллельно включённых фотопреобразователей (ФП); строятся кривые ВАХ ФП для начала и конца (с учётом деградации) срока существования КА, по которым рассчитываются выходные характеристики СБ; используются генетические алгоритмы оптимизации. Такие алгоритмы используются в статье [3], где по критерию минимальной массы или стоимости оптимизируется состав СЭП; из набора вариантов каждого блока (типа ФП, аккумулятора) подбираются состав СЭП и формулы батареи.

В работе [4] та же задача решается выбором оптимальной структуры СЭП и её компонентов (простым перебором вариантов), проверка решения проводится имитационным моделированием в Simulink. Примерно такой же подход и в статьях [5, 6], где после выполнения условий энергобаланса строятся графики, по которым и находится оптимальный вариант.

В диссертационной работе [7] задачу оптимизации удельной мощности и стоимости СЭП решают методами линейного программирования; все нелинейности (характеристики СБ и АБ) линеаризуют, задают ограничения на переменные (напряжение шины, формулы СБ и АБ), записывают уравнения энергобаланса, далее минимизируют функционал, отражающий удельную мощность.

В обзорной статье [8] рассматривается оптимизация параметров наземных солнечных электростанций; хотя у них есть большие отличия в целевой функции (нет ограничения массы, случайный характер освещённости и нагрузки и др.), многие применяемые подходы имеют параллели с задачей проектирования СЭП космического применения.

В статье [9] задача оптимизации решается итерационно, имитационным моделированием циклограммы работы и расчётом энергобаланса; на каждом участке рассчитываются температура и мощность СБ, определяется режим работы СЭП в зависимости от соотношения мощности, отбираемой от СБ, и мощности потребления нагрузки; для каждого режима рассчитываются соответствующие напряжения и токи источников энергии и силовых преобразующих устройств, степень заряженности АБ, потери мощности во всех устройствах СЭП; массы систем рассчитываются через удельные показатели. К недостаткам такой методики следует отнести то, что дискретные параметры систем выбираются из непрерывного ряда; поиск ведётся для заранее определённых вариантов, что не гарантирует нахождения глобального оптимума; после нахождения оптимального варианта требуется дополнительное уточнение параметров СЭП.

Одним из вариантов повышения энергоэффективности характеристик СЭП геостационарных КА является применение новых схемотехнических решений, которые применяются в силовых преобразователях ЭПА. Так, за последнее время было разработано несколько СЭП, где силовые преобразователи выполнены по схеме мостовых квазирезонансных инверторов [10]. Удельная мощность преобразователей, выполненных по схеме мостовых квазирезонансных инверторов, несколько хуже, чем у классических, из-за наличия большего числа транзисторов, трансформатора и сложного устройства управления.

Вместе с тем на уровне ЭПА применение таких преобразователей позволяет добиться выигрыша по удельным характеристикам за счет исключения силовых коммутаторов и снижения массы фильтров [14]. Разрабатываемые на базе мостовых квазирезонансных инверторов ЭПА позволяют обеспечить удельную мощность ЭПА на уровне 400 Вт/кг, в сравнении: 150...170 Вт/кг удельной мощности ЭПА на базе классических преобразователей [15, 16]. При этом ключевое преимущество квазирезонансных преобразователей с гальванической трансформаторной развязкой перед классическими понижающими и повышающими преобразователями заключается в том, что они обеспечивают возможность произвольного задания уровней входных напряжений.

Авторами статьи проведен анализ энергетической эффективности опытных образцов силовых модулей ЭПА, выполненных по схеме мостовых квазирезонансных инверторов, в различных диапазонах выходных напряжений АБ и СБ. Оценка энергетической эффективности проводилась по результатам испытаний модуля стабилизатора напряжения (СН) и разрядного устройства (РУ) с номиналом выходного напряжения 100 В. При этом модуль СН спроектирован для работы на ветви напряжения СБ.

Оценка параметров энергетической эффективности проводилась по методике, приведенной в [11]. Результаты оценки приведены в табл. 1.

В соответствии с методикой [11] потери в преобразователях описываются двумя константами линейной модели вида

$$P_{\text{вых}} = P_{\text{вх}} \cdot k - b,$$

где b – «собственное потребление» преобразователя не зависящее от текущего значения выходной мощности, Вт; k – «коэффициент передачи мощности», показывающий какую долю входной мощности преобразователь передает в нагрузку, %; $P_{\text{вых}}$ и $P_{\text{вх}}$ – выходная и входная мощности преобразователя соответственно, Вт.

Таблица 1

Результаты оценки параметров энергетической эффективности силовых преобразователей

Образец	Диапазон входных напряжений, В	Коэффициент передачи мощности, %	Собственное потребление, Вт
СН	104...150	94,7	6,8
РУ	64...90	95,7	7,5

Коэффициенты передачи мощности (КПМ) обоих устройств отличаются не более чем на 1,5% при сравнимом собственном потреблении и идентичной массе и выходной мощности модулей. Таким образом, в случае если значение выходного напряжения находится внутри диапазона значений входного напряжения, параметры энергетической и энергоэффективности квазирезонансного преобразователя будут не хуже представленных в табл. 1. При этом нахождение значения выходного напряжения внутри диапазона входных напряжений для классических ШИМ преобразователей требует наличия в составе силового модуля как повышающего, так и понижающего преобразователя, что существенно снижает энергоэффективные характеристики силового модуля.

Применение в ЭПА мостовых квазирезонансных инверторов дает возможность варьировать параметрами межблочного силового электрического интерфейса СЭП с сохранением параметров энергетической и энергоэффективности ЭПА. При этом оказывается возможным осуществить оптимизацию энергоэффективных характеристик СЭП в целом, когда за счет незначительного снижения энергоэффективных характеристик одних составных частей осуществляется существенное повышение энергоэффективных характеристик других составных частей СЭП.

Оптимизация энергоэффективных характеристик СЭП осуществляется за счет изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ. Независимое изменение количества последовательно соединенных элементов в АБ и СБ приводит к изменению их массы, массы бортовой кабельной сети (БКС), ЭПА и ПКЗ АБ. Действительно, увеличение количества последовательно соединенных ФП в СБ должно приводить к снижению массы БКС за счет снижения максимального тока СБ. Увеличение количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ (при фиксированной энергоёмкости АБ) приводит к увеличению массы АБ за счет роста доли массы конструкции в массе АБ и к увеличению массы ПКЗ АБ за счет роста требуемого количества каналов контроля. Но при этом снижается масса БКС между АБ и ЭПА за счет снижения максимальных значений тока разряда АБ.

Для достижения оптимальных энергомассовых характеристик СЭП требуется найти экстремум отношения ее выходной мощности к массе. В общем виде данный функционал можно определить следующими выражениями:

$$P_{уд} = P_{вых}/M \rightarrow \max, \quad (1)$$

$$M = M_{АБ} + M_{СБ} + M_{ЭПА} + M_{ПКЗ\ АБ} + M_{БКС\ СБ} + M_{БКС\ АБ}, \quad (2)$$

$$M_{АБ} = f_1(C_{АБ}, N_{АКК\ посл}), \quad (3)$$

$$M_{СБ} = f_2(N_{ФП\ посл}, N_{ФП\ паралл}), \quad (4)$$

$$M_{ЭПА} = f_3(P_{вых}, I_{АБ\ P_{max}}, I_{АБ3_{max}}, I_{СБ_{max}}, \quad (5)$$

$$M_{ПКЗ\ АБ} = f_4(N_{АКК\ посл}), \quad (6)$$

$$M_{БКС\ СБ} = f_5(I_{СБ_{max}}), \quad (7)$$

$$M_{БКС\ АБ} = f_6(I_{АБ\ P_{max}}), \quad (8)$$

где $P_{уд}$ – удельная выходная мощность СЭП, Вт/кг; $P_{вых}$ – выходная мощность СЭП, определяемая циклограммой нагрузки, Вт; M – масса СЭП, кг; $M_{АБ}$, $M_{СБ}$, $M_{ЭПА}$, $M_{ПКЗ\ АБ}$, $M_{БКС\ СБ}$, $M_{БКС\ АБ}$ – массы АБ, СБ, ЭПА, ПКЗ АБ, БКС СБ, БКС АБ соответственно, кг; $C_{АБ}$ – ёмкость аккумуляторов в АБ, А×ч; $N_{АКК\ посл}$ – количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, шт.; $N_{ФП\ посл}$, $N_{ФП\ паралл}$ – количество последовательно и параллельно соединенных ФП в СБ, шт.; $I_{АБ\ P_{max}}$ – максимальный ток разряда АБ, А; $I_{АБ3_{max}}$ – максимальный ток заряда АБ, А; $I_{СБ_{max}}$ – максимальный ток СБ, А; $f_1 - f_6$ – функции зависимости массы составных частей СЭП от их параметров.

Методика оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА при изменении последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ заключается в следующем.

1. Формируется перечень режимов функционирования КА на орбите, которые определяют требования к характеристикам составных частей СЭП: СБ, АБ, ПКЗ АБ и ЭПА.

2. Определяются диапазоны изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ.

3. На основе имитационной модели осуществляется расчет характеристик СЭП, удовлетворяющих условию положительного энергетического баланса в заданных расчетных случаях для всех значений количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ из заданного диапазона. В ходе имитационного моделирования в каждом расчетном случае определяются следующие характеристики:

- емкость комплекта АБ и требуемое количество параллельно соединенных ФП в СБ для обеспечения положительного энергетического баланса;
- количество проводов заданного сечения силовой кабельной сети между АБ и ЭПА, а также между СБ и ЭПА;
- количество каналов контроля и управления аккумуляторов в ПКЗ АБ;
- количество силовых модулей заданной мощности и энергетической эффективности в ЭПА;
- рабочие диапазоны напряжений и токов силового электрического интерфейса между СБ и ЭПА, а также между АБ и ЭПА;

- массы элементов СЭП: СБ, АБ, ПКЗ АБ, ЭПА, БКС СБ, БКС АБ;

- значение удельной мощности СЭП определяется в виде отношения значений выходной мощности к массе СЭП.

4. Формируется матрица значений массы СЭП размерностью $[n; m]$, где n – диапазон изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ, а m – диапазон количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ.

5. Осуществляется поиск соответствующих минимальному значению массы СЭП значений количества, последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ.

Рассмотрим далее применение методики и алгоритма для оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА с мощностью полезной нагрузки 6 и 13 кВт.

Характеристики системы электропитания космического аппарата должны быть выбраны таким образом, чтобы во всех режимах функционирования КА соблюдались условия положительного энергетического баланса.

Критерием положительного энергетического баланса является выполнение следующих условий:

- положительная разность зарядной и разрядной энергий комплекта АБ на наиболее энергонапряженном витке;

- достаточность мощности СБ для питания нагрузки и обеспечения заряда комплекта АБ.

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

- ёмкость комплекта аккумуляторных батарей и количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ;

- мощность солнечной батареи, т.е. количество последовательно и параллельно соединенных фотопреобразователей в СБ;

- учесть в энергетическом балансе КА потери в бортовой кабельной сети, а также в элементах СЭП.

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

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

В табл. 2 приведены характерные особенности приведенных условий, а также характеристики СЭП, которые должны быть определены при расчете энергетического баланса КА в данных условиях.

Качественно циклограммы нагрузки для геостационарного КА, которые должны быть использованы для расчета энергетического баланса, представлены на рис. 2.

В качестве инструмента для определения параметров СЭП и расчета энергетического баланса используется имитационная модель СЭП в статических режимах работы, определяемых мощностью нагрузки и условиями освещенности СБ [12].

Расчетные случаи для расчета энергетического баланса КА

Расчетный случай	Особенности условий функционирования КА	Определяемые характеристики СЭП
Конец САС, осеннее равноденствие	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	Энергоемкость и масса комплекта АБ. Требуемая в конце САС мощность СБ. Параметры межблочного силового электрического интерфейса СЭП (максимальные и минимальные значения токов и напряжений СБ, АБ и ЭПА на интерфейсе с СБ и АБ). Масса СБ. Масса БКС СБ и БКС АБ. Масса ПКЗ АБ. Значения потерь электрической энергии в элементах СЭП
Конец САС, летнее солнцестояние	Минимальная освещенность СБ на витке без ТУЗ	Требуемая в конце САС мощность СБ (подтверждение)
Начало САС, осеннее равноденствие	Сочетание максимальной длительности ТУЗ и минимальной освещенности при максимальной длительности ТУЗ в начале САС	Максимальное напряжение холостого хода СБ. Масса ЭПА в части наличия или отсутствия регулятора (ограничителя) максимального напряжения СБ

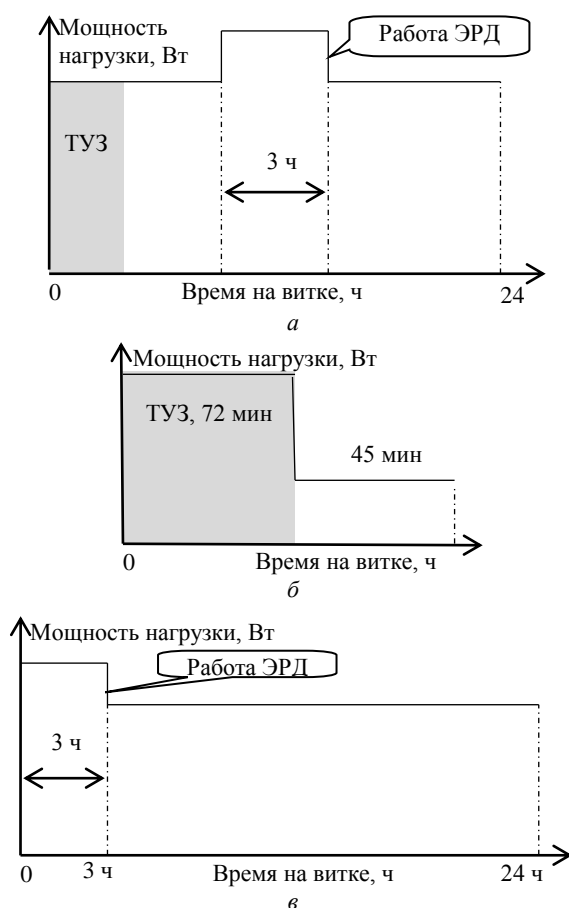


Рис. 2. Общий вид циклограмм нагрузки геостационарного КА: *a* – прохождение ТУЗ максимальной длительности в штатном режиме с последующим проведением коррекции удержания орбиты КА; *б* – прохождение ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в режим аппаратной солнечной ориентации (РАСО); *в* – проведение коррекции удержания орбитальной позиции КА; ЭРД – электрореактивный двигатель

Модель состоит из моделей СБ, АБ, силовой кабельной сети СЭП, энергетической модели ЭПА, включает в себя алгоритм, который реализует преимущественное использование и экстремальное регулирование мощности СБ, а также заряд АБ в режиме ограничения тока и в квазипотенциостатиче-

ском режиме. Также модель имеет в своем составе блоки задания мощности нагрузки, мощности солнечного излучения. Результат работы модели для расчетного случая функционирования КА в конце САС в период осеннего равноденствия по циклограмме нагрузки в соответствии с рис. 2, *a* представлен на рис. 3.

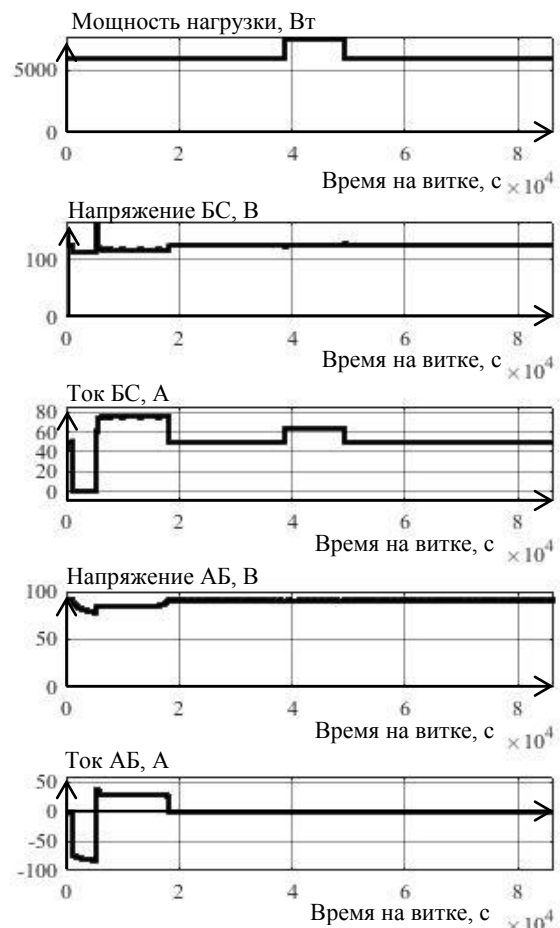


Рис. 3. Графики изменения параметров СЭП при работе по программе типового витка

Использование имитационной модели СЭП позволяет осуществить расчет энергетического баланса при заданной циклограмме нагрузки и услови-

ях освещенности и подбор минимально необходимых требований к энергоемкости АБ и мощности СБ.

Для оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА требуется осуществить перебор значений количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ из заданного диапазона при соблюдении условий положительного энергетического баланса КА. В свою очередь, соблюдение условий положительного энергетического баланса КА требует подбора значений ёмкости комплекта АБ и количества параллельно соединенных ФП в СБ при заданном количестве последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ. Таким образом, для решения задачи оптимизации энергомассовых характеристик СЭП требуется варьировать четыре параметра, минимизируя массу системы как функцию этих параметров с учетом имеющихся условий функционирования 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 положительного 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 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 определения 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 опреде-

ляется в единственном расчетном случае, которым является прохождение ТУЗ максимальной длительности с последующим переходом в РАСО в условиях осеннего равноденствия в конце САС. Ёмкости АБ, определенной для данного расчетного случая гарантированно будет достаточно для прохождения ТУЗ максимальной длительности;

- условие применения в составе ЭПА ЭРМ СБ обеспечивает достаточность мощности и площади СБ, определенной в условиях осеннего равноденствия в конце САС, для условий летнего солнцестояния в конце САС. Это означает, что для определения параметров СБ (мощность и площадь) достаточно провести расчеты энергетического баланса 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 количества последовательно соединенных ФП и аккумуляторов.

1. Определение требуемой ёмкости комплекта АБ для каждого из заданных в 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 в условиях осеннего равноденствия в конце САС (см. рис. 2, б). Диапазон изменения количества последовательно соединенных в АБ аккумуляторов принимается от 10 до 59 шт. и обусловлен имеющимися ограничениями в части максимального напряжения АБ.

2. Формирование диапазона количества последовательно соединенных ФП в СБ из области допустимых значений, обусловленной имеющимися ограничениями в части максимального напряжения СБ. Диапазон изменения количества последовательно соединенных ФП в СБ принимается от 30 до 79 шт.

3. Поиск минимального количества параллельно соединенных ФП в СБ, обеспечивающих выполнение условий неотрицательного энергетического баланса для расчетного случая в соответствии с рис. 2, а (виток с прохождением ТУЗ максимальной длительности) в условиях осеннего равноденствия в конце САС.

4. Подтверждение достаточности мощности СБ для выполнения условий положительного энергетического баланса КА в условиях согласно рис. 2, в.

5. Формирование матрицы значений количества последовательно соединенных ФП в СБ 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, удовлетворяющее условию обеспечения положительного энергетического баланса;

- каждому значению количества последовательно соединенных ФП в СБ ставится в соответствие минимально необходимое количество параллельно соединенных ФП в СБ, удовлетворяющее условию обеспечения положительного энергетического баланса;

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

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

Далее приведены результаты оптимизации энергомассовых характеристик СЭП геостационарных КА мощностью 13 и 6 кВт в сравнении со значениями удельных характеристик СЭП, которые получены с использованием количества последовательных элементов в СБ и АБ известных образцов СЭП геостационарных КА. Для известных решений количество последовательно соединенных ФП в СБ составляет 54 шт., а аккумуляторов в АБ – 20 шт.

Результаты расчета оптимальных энергомассовых параметров в виде графика зависимости удельной мощности СЭП от количества последовательно соединенных ФП в СБ и аккумуляторов в АБ для СЭП мощностью 13 кВт представлены на рис. 4.

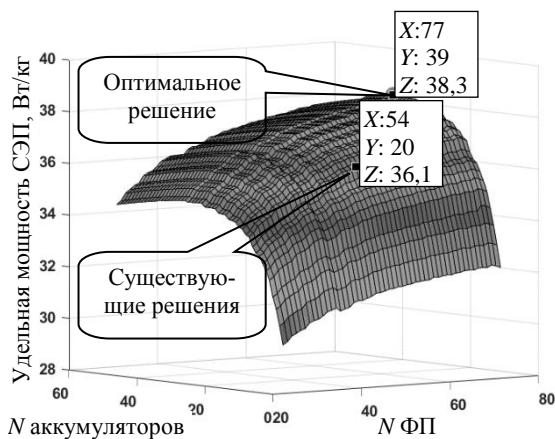


Рис. 4. График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 13 кВт

Позиция параметров СЭП, соответствующих наибольшему значению удельной мощности, отмечена графике. Максимальное значение удельной мощности СЭП достигается при количестве последовательно соединенных ФП в СБ, равном 77 шт., и количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, равном 39 шт.

На рис. 4 и далее количество последовательно соединенных аккумуляторов в АБ и ФП в СБ обозначены как « N ФП» и « N аккумуляторов» соответственно.

Таким образом, найдены параметры СЭП выходной мощностью 13 кВт рассматриваемой структуры и состава, при которых удельная мощность СЭП является максимальной для рассматриваемого диапазона изменения количества последовательно соединенных элементов в СБ и АБ.

Оптимизация энергомассовых характеристик СЭП геостационарного КА выходной мощностью 6 кВт показывает, что масса СЭП становится минимальной при количестве последовательно соединенных ФП в СБ, равном 78 шт., и количестве последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, равном 34 шт.

График удельной мощности СЭП для выходной мощности 6 кВт показан на рис. 5. Значение максимальной удельной мощности СЭП при оптимальных параметрах СБ и АБ составляет 33,1 Вт/кг.

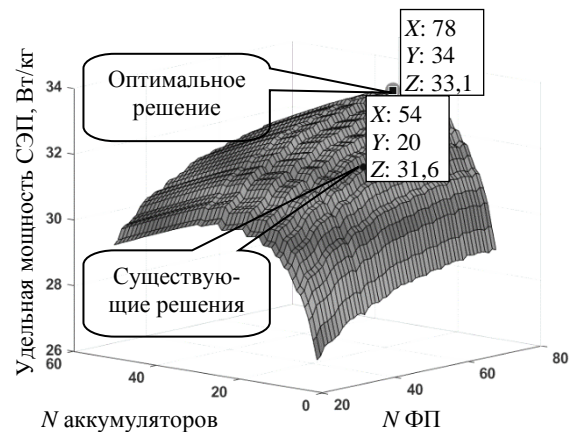


Рис. 5. График удельной мощности СЭП геостационарного КА мощностью 6 кВт

Анализ результатов показывает, что при увеличении количества последовательно соединенных ФП в СБ удельная мощность СЭП ожидаемо растет. Поэтому повышение удельной мощности при увеличении количества последовательно соединенных ФП в СБ ограничено только максимальным значением рабочего напряжения силовых транзисторов преобразователей ЭПА.

При изменении количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ на графике удельной мощности СЭП наблюдается экстремум. Максимальное значение удельной мощности СЭП наблюдается при значении количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ 34...39 шт. для диапазона выходной мощности СЭП от 6 до 13 кВт. Экстремальный характер изменения удельной мощности СЭП при увеличении количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ обусловлен ухудшением удельной энергоемкости АБ, ростом массы ПКЗ АБ и снижением массы БКС между АБ и ЭПА. Увеличение количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ, которое соответствует экстремуму энергомассовых характеристик СЭП, при росте выходной мощности СЭП обусловлено тем, что масса АБ и БКС между АБ и ЭПА пропорциональна выходной мощности, а масса ПКЗ АБ от нее не зависит. Поэтому с ростом выходной

мощности изменение параметров ПКЗ АБ, а именно количества каналов контроля и массы, оказывает меньшее влияние на результаты оптимизации. Следует ожидать, что при выходной мощности СЭП, превышающей 13 кВт, оптимальное значение количества последовательно соединенных аккумуляторов в АБ должно составить более 39 шт. (ориентировочно 40...42 шт.).

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.

Заключение

Разработанная методика позволяет выполнить параметрическую оптимизацию энергомассовых характеристик СЭП и задать требования к СЭП предложенной структуры и типа силовых преобразователей ЭПА, обеспечивающие достижение максимальной удельной мощности СЭП в заданном диапазоне изменения количества последовательно соединенных фотопреобразователей в СБ и аккумуляторов в АБ. Для заданной области параметров методика позволяет определить глобальный минимум массы системы при удовлетворении требований по мощности и положительности энергодолга.

Предварительная оценка итоговых результатов исследований показывает, что оптимизация по предложенной методике 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.

Литература

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Исляев. – Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская изд. фирма, 1994. – 318 с.
2. Oukil S. Geostationary Communication Satellite Solar Array Optimization Using Gravitation Search Algorithm / S. Oukil, A. Boudjemai // *Journal of Aerospace Technology and Management*. – 2020. – No. 12. – 25 p.
3. Trade-off analysis of low earth orbit spacecraft power supply system by Genetic algorithm / A.M. Mohamed, F.E. Amer, R.M. Mostafa, A.A. Mahmoud // 2016 IEEE Aerospace Conference. – Big Sky, MT, USA: IEEE, 2016. – 13 p.
4. Magalhães R.O. Space Power Topology Selection and its System Level Modeling and Control / R.O. de Magalhães, H.P. Moreira // *Journal of Aerospace Technology and Management*. – 2020. – No. 12. – 18 p.

5. Madhusudhana C.S. Modeling for evaluating efficiency of spacecraft power systems / C.S. Madhusudhana, G.N.V. Prasad, C.D. Sridhara // 2014 Power and energy systems conference: towards sustainable energy. – Bangalore, India: IEEE, 2014. – 7 p.

6. Asif S. Spacecraft Power Subsystem Technology Selection / S. Asif, Y. Li // 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. – Windsor, UK: IEEE, 2006. – 7 p.

7. Flath A. Mathematical Programming Approach for the Design of Satellite Power Systems: master's thesis. – Kentucky, USA: University of Kentucky Libraries, 2019. – 73 p.

8. Alsadi S. Photovoltaic Power Systems Optimization Research Status: A Review of Criteria, Constrains, Models, Techniques, and Software Tools / S. Alsadi, T. Khatib // *Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 8, No. 10. – P. 1761.

9. Шиняков Ю.А. Энергетический анализ структурных схем систем электроснабжения автоматических космических аппаратов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2006. – Т. 309, № 8. – С. 152–155.

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

11. Нестеришин М.В. Методика оценки энергетической эффективности энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов / М.В. Нестеришин, В.Г. Букреев, Р.В. Козлов, А.В. Журавлев // *Доклады ТУСУР*. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 112–118.

12. Simulation Model of Spacecraft Power System for Power Balance Calculation / R.V. Kozlov, V.G. Bukreev, M.V. Nesterishin, A.T. Lelekov // 2020 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM). – Novosibirsk: IEEE, 2020. – 7 p.

13. Stark J. *Electrical Power Systems*. – NY: John Wiley & Sons, 2011. – 356 p.

14. Бугай Т.В. Конструктивные особенности модулей энергопреобразующей аппаратуры нового поколения / Т.В. Бугай, В.В. Быков, А.М. Гильжинский // *Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XIX науч.-техн. конф.* – Томск: АО «НПЦ «Полус», 2015. – С. 16–18.

15. Борисенко В.Ю. Энергопреобразующая аппаратура нового поколения / В.Ю. Борисенко, Р.В. Козлов, К.В. Тараканов // *Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XIX науч.-техн. конф.* – Томск: АО «НПЦ «Полус», 2015. – С. 15–16.

16. Крючков П.А. Анализ достигнутых характеристик систем электропитания платформ «Экспресс-1000Н» и «Экспресс-2000» / П.А. Крючков, Д.С. Карплюк // *Электронные и электромеханические системы и устройства: тез. докл. XIX науч.-техн. конф.* – Томск: АО «НПЦ «Полус», 2015. – С. 11–13.

Козлов Роман Викторович

Нач. группы отд. бортовых систем электропитания космических аппаратов АО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М.Ф. Решетнева
 Ленина ул., 52, г. Железногорск, Россия, 692972
 Тел.: +7 (391-9) 76-41-57
 Эл. почта: krv@iss-reshetnev.ru

Букреев Виктор Григорьевич

Д-р техн. наук, профессор
 Национальный исследовательский
 Томский политехнический университет (НИ ТПУ)
 Ленина пр., 30, г. Томск, Россия, 634050
 Тел.: +7 (382-2) 56-40-45
 Эл. Почта: bukreev@tpu.ru

Лелеков Александр Тимофеевич

Канд. техн. наук, с.н.с. лаборатории космических систем
 и технологий Федерального исследовательского центра
 «Красноярский научный центр
 Сибирского отделения Российской академии наук»
 Академгородок, 50, г. Красноярск, Россия, 660036
 Тел.: +7 (391-2) 49-45-85
 Эл. почта: lelekov@iph.krasn.ru

Kozlov R.V., Bukreev V.G., Lelekov A.T.

Optimization technique for energy mass characteristics of the EPS of a geostationary spacecraft

This article determines a methodology to maximize a specific power of the electrical power system of a geostationary spacecraft, using the EPS simulation model. A typical (for GEO spacecraft) fully-regulated EPS structure is considered. The advantages of using the full-bridge quasi-resonant converters with galvanic isolation are considered. The results of the energy efficiency estimation of power converters at various ranges of input voltages, as well as the criteria and conditions for calculating the positive energy budget of a GEO spacecraft are presented. The application of the EPS simulation model is shown and the results of optimization of the proposed EPS energy and mass characteristics for 6 and 13 kW payloads are described.

Keywords: spacecraft electrical power system, optimization of energy and mass characteristics, simulation model, specific power of the spacecraft electrical power system.

doi: 10.21293/1818-0442-2021-24-1-83-90

References

1. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft electrical power systems]. Novosibirsk, Nauka, 1994. 318 p. (in Russ.).
2. Oukil S., Boudjemai A. Geostationary Communication Satellite Solar Array Optimization Using Gravitation Search Algorithm. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2020, no. 12, 25 p.
3. Mohamed A.M., Amer F.E., Mostafa R.M., Mahmoud A.A. Trade-off analysis of low earth orbit spacecraft power supply system by Genetic algorithm. Proc. of 2016 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA, IEEE, 2016, 13 p.
4. Magalhães R.O., Moreira H.P. Space Power Topology Selection and its System Level Modeling and Control. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 2020, no. 12, pp. 12–18.
5. Madhusudhana C.S., Prasad G.N.V., Sridhara C.D. Modeling for evaluating efficiency of spacecraft power systems. Proceedings of 2014 Power and Energy Systems: towards sustainable energy, Bangalore, India, IEEE, 2014, 7 p.
6. Asif S., Li Y. Spacecraft Power Subsystem Technology Selection. Proc. of 2006 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Windsor, UK, IEEE, 2006, 7 p.
7. Flath A. *Mathematical Programming Approach for the Design of Satellite Power Systems*. Master's thesis. Kentucky, USA, University of Kentucky Libraries, 2019, 73 p.

8. Alsadi S., Khatib T. Photovoltaic Power Systems Optimization Research Status: A Review of Criteria, Constrains, Models, Techniques, and Software Tools. *Applied Sciences*, 2018, vol. 8, no. 10, p. 1761.

9. Shinyakov Yu.A. [Energy analysis of structural diagrams of spacecraft electrical power systems] *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2006, vol. 309, no. 8, pp. 152–155 (in Russ.).

10. Stolyarov A.N., Polyn D.I. [Resonant converter based discharge module with increased efficiency in a wide range of input voltages] *Proceedings of the XXth Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 37–40 (in Russ.).

11. Nesterishin M.V., Bukreev V.G., Kozlov R.V., Zhuravlev A.V. [Method to Estimate the Energy Efficiency of Power Conditioning Units in Spacecrafts Electric Power Systems] *Proceedings of TUSUR University*, 2018, vol. 21, no.1, pp. 112–118 (in Russ.).

12. Kozlov R.V., Bukreev V.G., Nesterishin M.V., Lelekov A.T. [Simulation Model of Spacecraft Power System for Power Balance Calculation] *Proc. of 21st International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, Novosibirsk, IEEE, 2020, 6 p.

13. Stark J. *Electrical Power Systems*, NY, John Wiley & Sons, 2011, 356 p.

14. Bugaj T.V., Bykov V.V., Gil'zhinskij A.M. [Design features of new generation power conditioning units] *Proceedings of the XIXth Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 16–18 (in Russ.).

15. Borisenko V.YU., Kozlov R.V., Tarakanov K.V. [New generation power conditioning units] *Proceedings of the XIXth Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 15–16 (in Russ.).

16. Kryuchkov P.A., Karplyuk D.S. [Analysis of the achieved characteristics of the electrical power systems of the «Express-1000H» and «Express-2000» platforms] *Proceedings of the XIXth Conference in Electronical and Electromechanical Systems and Devices*, Tomsk, AO «NPC «Polyus», 2020, pp. 16–18 (in Russ.).

Roman V. Kozlov

Head of Spacecraft On-board Power Systems Sector,
 Joint-Stock Company «Academician M.F. Reshetnev
 «Information Satellite Systems»
 52, Lenin st., Zheleznogorsk, Russia, 692972
 Phone: +7 (391-9) 76-41-57
 Email: krv@iss-reshetnev.ru

Victor G. Bukreev

Doctor of Science in Engineering, Professor
 Tomsk Polytechnic University
 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
 Phone: +7 (382-2) 56-40-45
 Email: bukreev@tpu.ru

Alexander T. Lelekov

Candidate of Science in Engineering, Researcher of Space
 Systems and Technologies Laboratory,
 Krasnoyarsk Science Center of the Siberian Branch
 of the Russian Academy of Sciences
 50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, Russia, 660036
 Phone: +7 (391-2) 49-45-85
 Email: lelekov@iph.krasn.ru