

На правах рукописи



Журавлев Иван Михайлович

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ
МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА
НА ОСНОВЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО
РЕЗЕРВИРОВАННОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2024

Работа выполнена в акционерном обществе «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва»

Научный руководитель – кандидат технических наук
Кочура Сергей Григорьевич

Официальные оппоненты:

Харитонов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор; федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра электроники и электротехники, заведующий кафедрой;

Гарганеев Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики, отделение электроэнергетики и электротехники, профессор.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Защита состоится «18» сентября 2024 г. в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.404.12, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Киренского, 26, корпус №14, ауд. 21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан ____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью увеличения срока активного существования малых космических аппаратов за счет повышения эффективности преобразования электроэнергии и снижения массы системы электропитания. Ограничения допустимой массы спутника связаны с конструкционными и эксплуатационными особенностями, а именно – со скоростью расхода топлива для двигателей коррекции орбиты. Для корректной работы космического аппарата требуется обеспечить точное позиционирование относительно Земли. Соответственно, минимизация массы спутника, а, значит, и расход топлива при корректировке орбиты позволяет увеличить срок активного существования малого космического аппарата.

При этом, возможности по снижению массы системы электропитания малых космических аппаратов в значительной степени ограничиваются требованиями по обеспечению надежности, в частности – сохранение работоспособности при единичном отказе произвольного элемента. Учитывая, что основную массу в энергопреобразующей аппаратуре системы электропитания представляет теплоотводящая конструкция и моточные элементы, оптимальным решением является применение резервированных резонансных преобразователей энергии.

Степень разработанности темы диссертации. В области повышения характеристик систем электропитания малых космических аппаратов, в том числе увеличения энергоэффективности, повышения надежности и удельной мощности, внесли В. И. Иванчура, С. А. Харитонов, А. В. Осипов, А. Г. Гарганеев, Б. П. Соустин, Ю. В. Краснобаев, Ю. А. Шиняков, L. L. Grigsby, A. H. Weinberg, R. Mukund и др.

К отечественным организациям, внесшим основной вклад в разработку систем электропитания малых космических аппаратов и их составных частей, можно отнести АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнёва» (г. Железногорск), ФГБОУ ВО «НГТУ» (г. Новосибирск), ФГУП «НПО им. С. А. Лавочкина» (г. Химки), ФГАО ВО «НИ ТПУ» (г. Томск), АО «НПЦ «Полус» (г. Томск), ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ Прогресс» (г. Самара). Среди зарубежных компаний можно выделить SpaceSystems/Loral (США), The Boeing Company (США), Thales Alenia Space (Франция, Италия).

Объект исследования – система электропитания малого космического аппарата.

Предмет исследования – энергетические характеристики резервированного резонансного преобразователя энергии.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности системы электропитания малого космического аппарата на основе резонансного резервированного преобразователя энергии.

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

1. Выполнен анализ основных структур систем электропитания малых космических аппаратов с учетом требований по электрическим, надежностным и массогабаритным характеристикам;

2. Разработан резонансный резервированный преобразователь энергии с сохранением режима низкодиссипативной коммутации всех силовых транзисторов;

3. Разработана методика проектирования системы электропитания с учетом требований по КПД и изменения ВАХ солнечной батареи в процессе работы;

4. Проведена верификация полученных данных результатами экспериментального исследования.

Методы исследований базируются на классических методах анализа электрических и магнитных цепей, применения математического и имитационного моделирования, а также методах экспериментальных исследований.

Соответствие паспорту специальности 2.4.2 – электротехнические комплексы и системы: п. 1. – «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»; п. 2. – «Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов»; п. 3. – «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления».

Научная новизна:

1) Предложена оригинальная схема резонансного преобразователя энергии, на основе мостового инвертора напряжения, отличающаяся отсутствием силового трансформатора и сохраняющая работоспособность при единичном отказе произвольного силового элемента в различных режимах работы.

2) Разработан алгоритм однополярного кодово-импульсного регулирования для резонансного преобразователя, обеспечивающий сохранение низкодиссипативной коммутации всех транзисторов при неполной глубине регулирования выходного напряжения.

3) Впервые получены аналитические выражения и графические зависимости регулировочных характеристик и КПД резонансного бестрансформаторного преобразователя в различных режимах работы.

Практическая ценность работы:

1) Отсутствие точки единичного отказа в силовой части резонансного бестрансформаторного преобразователя позволяет снизить массу системы электропитания малого космического аппарата за счет оптимизации резервного комплекта преобразователей.

2) Предложенный резонансный бестрансформаторный преобразователь энергии солнечной батареи позволяет снизить потери мощности на 14 %, при токах нагрузки более 12 А (по сравнению с резервированным понижающим преобразователем), что позволяет уменьшить массу системы электропитания за счет оптимизации теплоотводящей конструкции.

3) Предложенная методика проектирования позволяет провести комплексную оценку КПД резонансного бестрансформаторного преобразователя, с учетом изменения параметров солнечной батареи, требуемой точности стабилизации и параметров нагрузки.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Применение резонансного бестрансформаторного преобразователя повышает надежность системы электропитания малого космического аппарата за счет снижения тепловой нагрузки на элементы силовой части, а также исключения точки единичного отказа в каналах преобразования энергии.

2) Использование однополярного кодово-импульсного регулирования повышает КПД резонансной энергопреобразующей аппаратуры малого космического аппарата за счет сохранения низкодиссипативной коммутации транзисторов в процессе регулирования выходного напряжения.

3) Нелинейность регулировочной характеристики резонансного бестрансформаторного преобразователя с однополярным кодово-импульсным снижается при уменьшении $K_{\text{мод}}$ за счет уменьшения глубины разряда выходного конденсатора.

Использование полученных результатов. Научные и практические результаты работы применяются при проектировании и проведении испытаний энергопреобразующей аппаратуры АО «РЕШЕТНЁВ» (г. Железногорск, Красноярский край).

Достоверность научных положений и выводов подтверждается сходимостью между собой результатов имитационного моделирования и экспериментальной отработки.

Личный вклад автора заключается в формировании основных предпосылок исследования, в разработке имитационной модели, получении аналитических выражений и графических зависимостей основных энергетических характеристик системы электропитания на основе резонансного бестрансформаторного преобразователя, в создании методики проектирования резонансного бестрансформаторного преобразователя для системы электропитания малого космического аппарата с учетом изменения параметров солнечной батареи и требуемого КПД, в проведении экспериментального исследования и обработке результатов.

Апробация результатов. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Всероссийском молодежном конкурсе научно-технических работ «Орбита Молодежи 2018» (Красноярск, 2018); XXII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева «Решетневские чтения-2018» (Красноярск, 2018); XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика Михаила Федоровича Решетнева «Решетневские чтения-2019» (Красноярск, 2019); V Международном Форуме «Микроэлектроника-2019» (Алушта, 2019); XIV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (Новосибирск, 2019); II Отраслевой научно-

практической конференции «Созвездие Роскосмоса»: траектория науки» (Красноярск, 2023).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, включая 8 работ в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 работу, индексируемую в Scopus, 5 материалов общероссийских и международных конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 134 наименований, двух приложений, содержит 135 страниц основного текста, 65 рисунков и шесть таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлена научная новизна и отражены теоретическая и практическая значимость работы, степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе приведены основные структуры системы электропитания (СЭП) малых космических аппаратов (МКА) – с отдельным преобразованием энергии и буферным подключением аккумуляторной батареи (АБ) к выходной шине электропитания (ВШЭ), рассмотрены циклограммы работы энергопреобразующей аппаратуры (ЭПА) и условия перехода из одного режима в другой. Учитывая необходимость максимизации КПД и удельных массогабаритных характеристик (рассматривается коэффициент удельной мощности $K_{ум}$, Вт/кг) энергопреобразующего комплекса (ЭПК), по результатам анализа основных структур, сделан вывод о приоритетности применения СЭП МКА с буферным подключением АБ к ВШЭ, ввиду отсутствия двойного преобразования энергии и сниженных требований к системе стабилизации выходного напряжения.

Результат анализа ЭПА на основе резервированных (на основе непосредственного понижающего и повышающего преобразователей) и резонансных схем (на основе инверторно-трансформаторных преобразователей, таких как двойной активный мост, вольтодобавочный преобразователь, индуктивно-емкостной преобразователь) преобразования энергии, с позиции обеспечения требований надежности, КПД и $K_{ум}$, показал:

– резервированные схемы на основе непосредственных преобразователей обладают требуемым уровнем надежности, при сохранении высоких значений $K_{ум}$, однако обладают недостаточным уровнем КПД из-за высоких коммутационных потерь;

– резонансные схемы на основе инверторно-трансформаторных преобразователей обеспечивают высокий уровень КПД за счет низкодиссипативной коммутации (НДК), однако не позволяют обеспечить требуемый уровень надежности и $K_{ум}$.

Учитывая необходимость последовательного соединения элементов силовой части преобразователя (для обеспечения требований надежности), а

также то, что основные потери мощности в ЭПА МКА с буферным подключением АБ к ВШЭ обеспечиваются при токах солнечной батареи (СБ) близких к токам короткого замыкания, сделан вывод о перспективности резервированного непосредственного понижающего преобразователя (рисунок 1а). Модификация схемы преобразователя для обеспечения работы при единичном отказе элемента на обрыв (рисунок 1б), а также перенос реактивных элементов в колебательный контур (рисунок 1в) и оптимизация числа диодов, привела к синтезу резонансного бестрансформаторного преобразователя (РБП) энергии СБ.

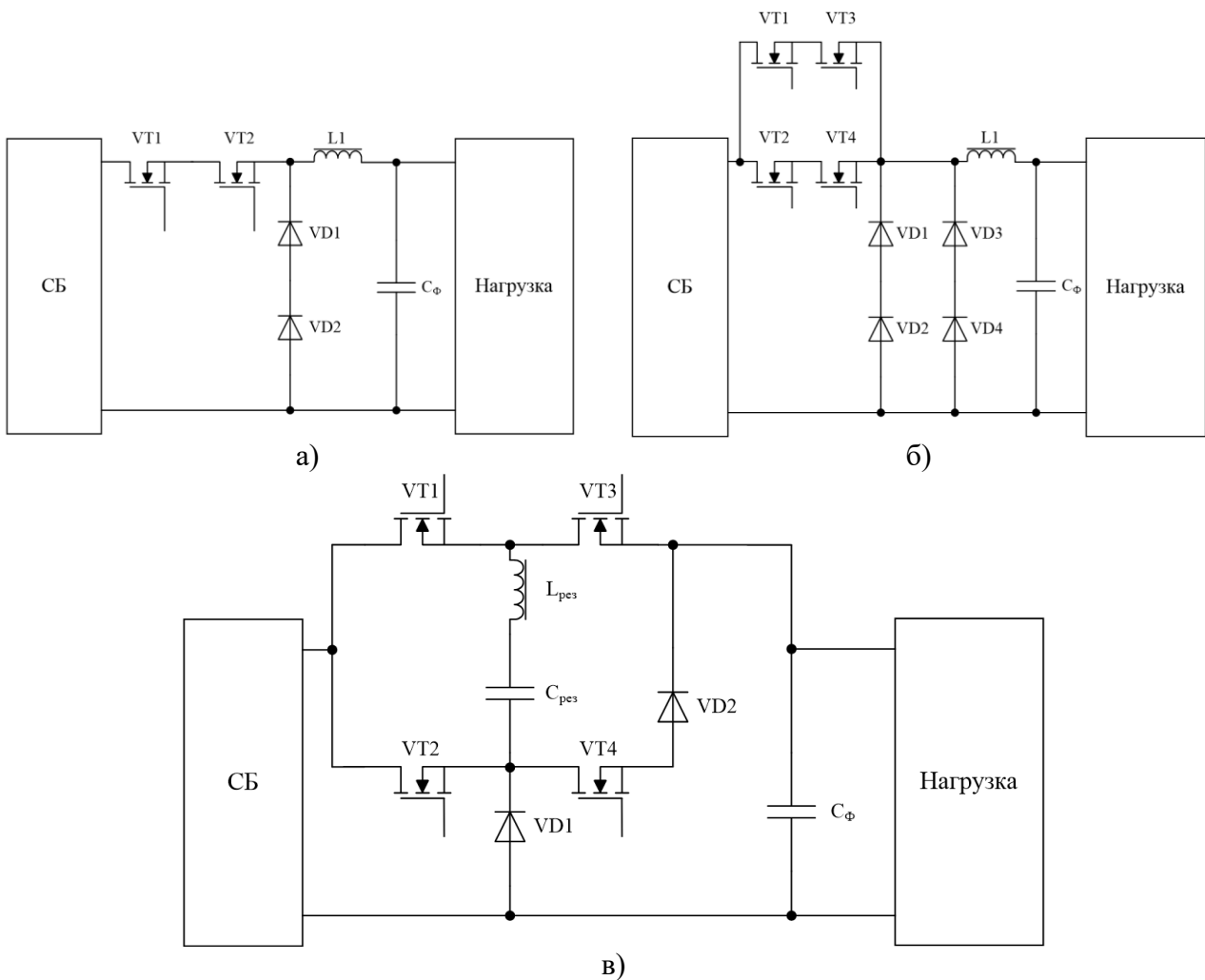


Рисунок 1 – Синтез резервированного резонансного преобразователя: а) резервированный понижающий преобразователь (единичный отказ на КЗ); б) резервированный понижающий преобразователь (единичный отказ на КЗ или обрыв); в) резонансный бестрансформаторный преобразователь.

РБП обеспечивает работу в следующих режимах:

– прямая передача энергии СБ в нагрузку. В этом режиме транзисторы VT1-VT4 постоянно замкнуты, что позволяет разделить поток энергии, повысив КПД преобразователя при высокой нагрузке;

– регулирование выходного напряжения. В этом режиме транзисторные диагонали VT1-VT3 и VT2-VT4 попеременно коммутируют на резонансной

частоте колебательного контура, обеспечивая низкодиссипативную коммутацию (НДК);

– передачу энергии СБ в нагрузку при единичном отказе произвольного элемента как на короткое замыкание, так и на обрыв. В этом режиме транзисторы VT1-VT4 работают в режиме прямой передачи энергии, замыкаясь и размыкаясь в зависимости от выходного напряжения.

Таким образом, РБП, по сравнению с рассмотренными схемами преобразователей, обладает повышенными показателями надежности (единичный отказ как на КЗ, так и на обрыв не приводит к отказу преобразователя), КПД (за счет низкодиссипативной коммутации) и $K_{ум}$ (ввиду отсутствия силового трансформатора и минимизации реактивных элементов за счет работы на высокой частоте).

Во второй главе рассмотрены основные способы управления резонансными преобразователями. Показано, что применение импульсного регулирования, основанного на ШИМ, приводит к появлению фазового сдвига между первыми гармониками тока и напряжения в колебательном контуре и срыву резонансного режима работы. Применение дополнительной обратной связи (например, использование системы фазовой автоподстройки частоты) для нивелирования фазового сдвига приводит к принципиальной невозможности обеспечения НДК всех транзисторов, ввиду различия резонансной и подстроенной рабочей частот.

Для минимизации потерь мощности, были рассмотрены дискретно-импульсные способы управления, на основе кодово-импульсного регулирования (КИР).

Для дальнейшего рассмотрения алгоритмов управления необходимо ввести следующие определения:

– период модуляции $T_{мод}$ – интервал времени, в течение которого происходит однократное изменение кодовой комбинации;

– кратность кодовой комбинации $K_{мод}$ – отношение вида $T_{мод}/T_{раб}$, натуральное число;

– период вынужденных колебаний $T_{вын}$ – интервал времени, в течение которого происходит передача энергии в нагрузку через колебательный контур;

– кратность вынужденных колебаний $K_{вын}$ – отношение вида $T_{вын}/T_{раб}$, натуральное число;

– период свободных колебаний $T_{св}$ – интервал времени, в течение которого происходит регулирование выходного напряжения;

– кратность свободных колебаний $K_{св}$ – отношение вида $T_{св}/T_{раб}$, натуральное число;

– кодовая комбинация (КК) – отношение вида $K_{вын}/K_{мод}$, изменяется в диапазоне $[0, 1]$, с шагом $1/K_{мод}$.

Принцип работы алгоритма КИР – для системы управления преобразователем задана таблица КК, в которой каждой комбинации соответствует количество и последовательность $T_{вын}$, $T_{св}$, $T_{мод}$. Также задана функция $f(x)$, позволяющая однозначно связать КК с величиной ошибки стабилизации выходного напряжения. В начале $T_{мод}$, происходит однократное

изменение КК для минимизации отклонения от стабилизируемого значения. Изменение КК происходит последовательно для исключения режимов нестабильной работы.

Учитывая фиксированный диапазон напряжений ВШЭ, а также то, что соотношение между максимальным рабочим напряжением СБ и минимальным напряжением ВШЭ МКА редко превышает 0,5, сделан вывод о необходимости модификации алгоритма управления КИР в части ограничения диапазона регулирования. Был разработан алгоритм однополярного кодово-импульсного регулирования (ОКИР), основным отличием является включение в $T_{св}$ дополнительных интервалов подключения колебательного контура к источнику питания, равных $0,5 \cdot T_{раб}$ (рисунок 2). Таким образом, $T_{мод}$ ОКИР можно представить в виде эквивалентного периода ШИМ с дискретно изменяемой шириной импульса $\gamma_{экв_ОКИР} \in [0,5, 0,5+1/(2 \cdot K_{мод}), \dots, 1]$.

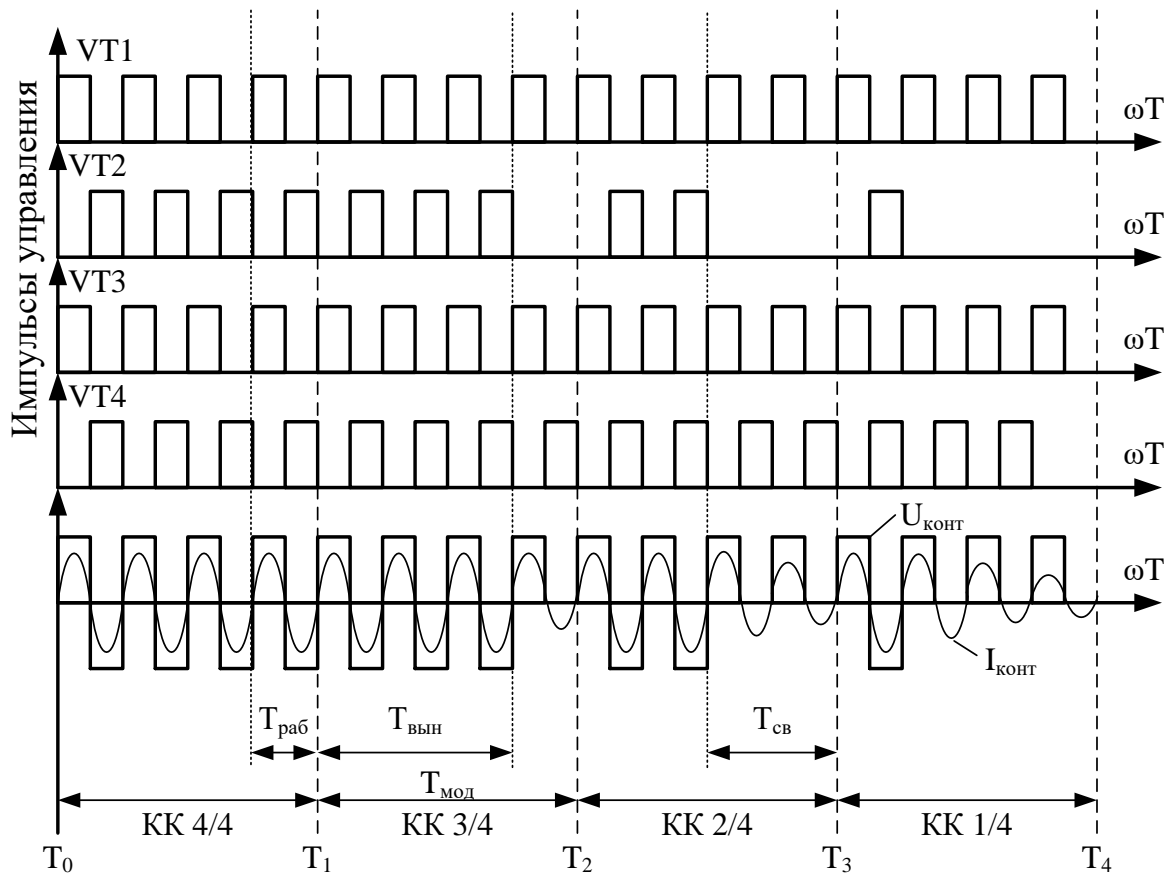


Рисунок 2 – Однополярное кодово-импульсное регулирование

В отличие от КИР, получение аналитического выражения для ОКИР, описывающего с требуемой точностью функцию изменения напряжения, в зависимости от выбранной КК является нетривиальной задачей ввиду нелинейности процесса перезаряда резонансного конденсатора (рисунок 3). В качестве решения, возможно построение кусочно-нелинейной функции напряжения с общим периодом равным $T_{мод}$, интервалами заряда/разряда равными $0,5 T_{раб}$ и дальнейшей аппроксимацией результатов в виде экспоненциальной функции. Такой способ позволяет с погрешностью до 10 % получить описание

нелинейного процесса перезаряда емкости через экспоненциальные функции вида $K_1 \cdot [1 - \exp(K_2)] \cdot \exp(K_3)$ и $K_4 \cdot [1 - \exp(K_5)] + K_6 \cdot \exp(K_7)$, где $K_1 - K_7$ – безразмерные коэффициенты.

Из алгоритма работы ОКИР видно, что регулирование выходного напряжения обеспечивается чередованием периодов заряда/разряда выходного конденсатора C_Φ . Считая, что нагрузка является чисто активной, и преобразователь работает в установившемся режиме, изменение выходного напряжения можно описать как

$$\frac{U_{CB}(I_{CB})}{T_{MOD}} \int_0^{T_{MOD}} \left(1 - e^{-\frac{K_{ВЫН}}{K_{МОД}} t}\right) dt = \frac{U_H}{T_{MOD}} \cdot \int_0^{T_{MOD}} \left(1 - e^{-\frac{K_{СВ}}{2 \cdot K_{МОД}} t}\right) \cdot e^{-\frac{K_{СВ}}{2 \cdot K_{МОД}} t} dt \quad (1)$$

При расчете (1) необходимо учитывать влияние диода VD1, который будет ограничивать величину и скорость разряда C_Φ и $C_{рез}$, обеспечивая режим прерывистого тока. Длительность участков прерывистого тока, а, следовательно, и внесение нелинейности в регулировочную характеристику будет определяться скоростью разряда $C_{рез}$, которая ограничивается величиной $L_{рез}$ и R_H :

$$\begin{cases} I_{C_{рез}} = I_{L_{рез}} = \frac{U_H}{R_H} - I_{C_\Phi}; \\ I_{C_{рез}} = C_{рез} \cdot \frac{dU_{C_{рез}}}{dt}; \\ I_{C_\Phi} = C_\Phi \cdot \frac{dU_H}{dt}. \end{cases} \quad (2)$$

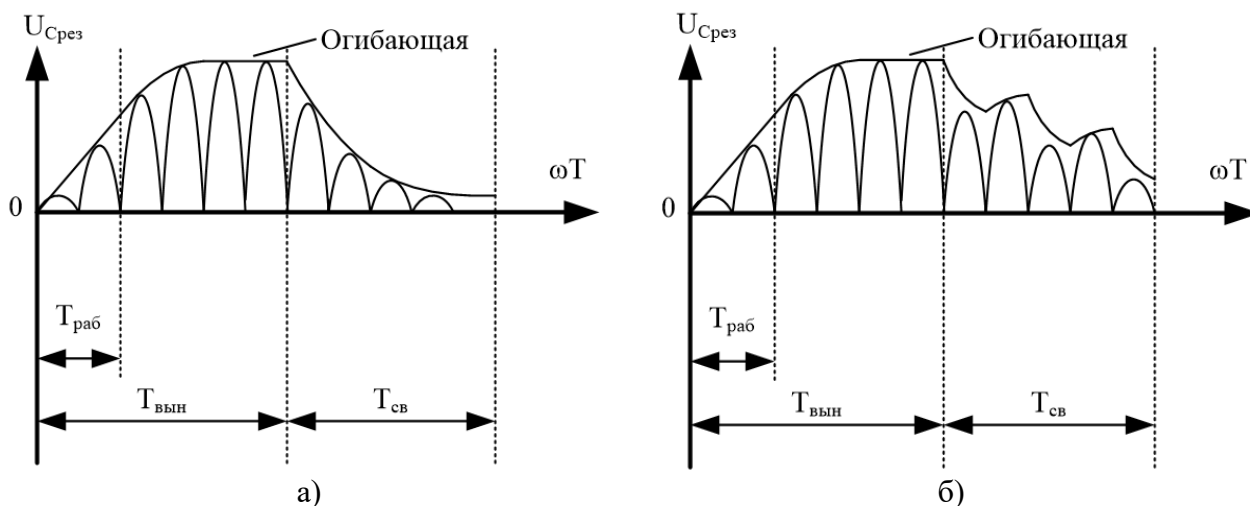


Рисунок 3 – Огибающая напряжения на конденсаторе колебательного контура при регулировании выходного напряжения: а) при кодово-импульсном регулировании; б) при однополярном кодово-импульсном регулировании.

Совместный учет (1) и (2) демонстрирует наличие зависимости регулировочной характеристики РБП с ОКИР как от выбранной КК, так и от параметров нагрузки. Кроме того, с ростом добротности колебательного контура $Q_{конт}$ регулировочная характеристика изменяет характер с экспоненциального на близкий к линейной форме (при $Q_{конт} \gg 1$), что обусловлено увеличением падения

напряжения на элементах колебательного контура и линеаризацией характера изменения тока $L_{рез}$.

В общем виде, с учетом пульсаций выходного напряжения и неполной глубины регулирования, регулировочная характеристика РБП с ОКИР в режиме регулирования выходного напряжения описывается уравнением:

$$\frac{U_n(K_{вын}, K_{мод}, I_{СБ}, R_n)}{U_{СБ}(I_{СБ})} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \left[1 - \frac{K_{вын}}{K_{мод} - 1} \cdot e^{-\frac{1+Q_{конт}(R_n)}{K_{мод}}} \cdot f(R_n) \right] \quad (3)$$

где $f(R_n)$ – безразмерная функция экспоненциального вида, зависящая от параметров нагрузки.

Учет потерь на открытой транзисторной диагонали и элементах колебательного контура, в режиме регулирования выходного напряжения, позволяет преобразовать (1):

$$\frac{U_n(K_{вын}, K_{мод}, I_{СБ}, R_n)}{U_{СБ}(I_{СБ})} = 1 - \left(\frac{1}{2} \cdot e^{-\frac{K_{вын}}{K_{мод} \cdot Q_{конт}(R_n)}} + \frac{I_n(I_{СБ}) \cdot R_{посл}}{U_{СБ}(I_{СБ})} \right), \quad (4)$$

$$R_{посл}(Q_{конт}, R_n) = R_n \cdot Q_{конт}(R_n) + 2 \cdot R_{СИ} \quad (5)$$

Полученные с помощью (4) регулировочные характеристики РБП с ОКИР (рисунок 4), в режиме регулирования выходного напряжения, при питании от СБ с ВАХ экспоненциального вида, демонстрируют рост нелинейности при увеличении $K_{мод}$.

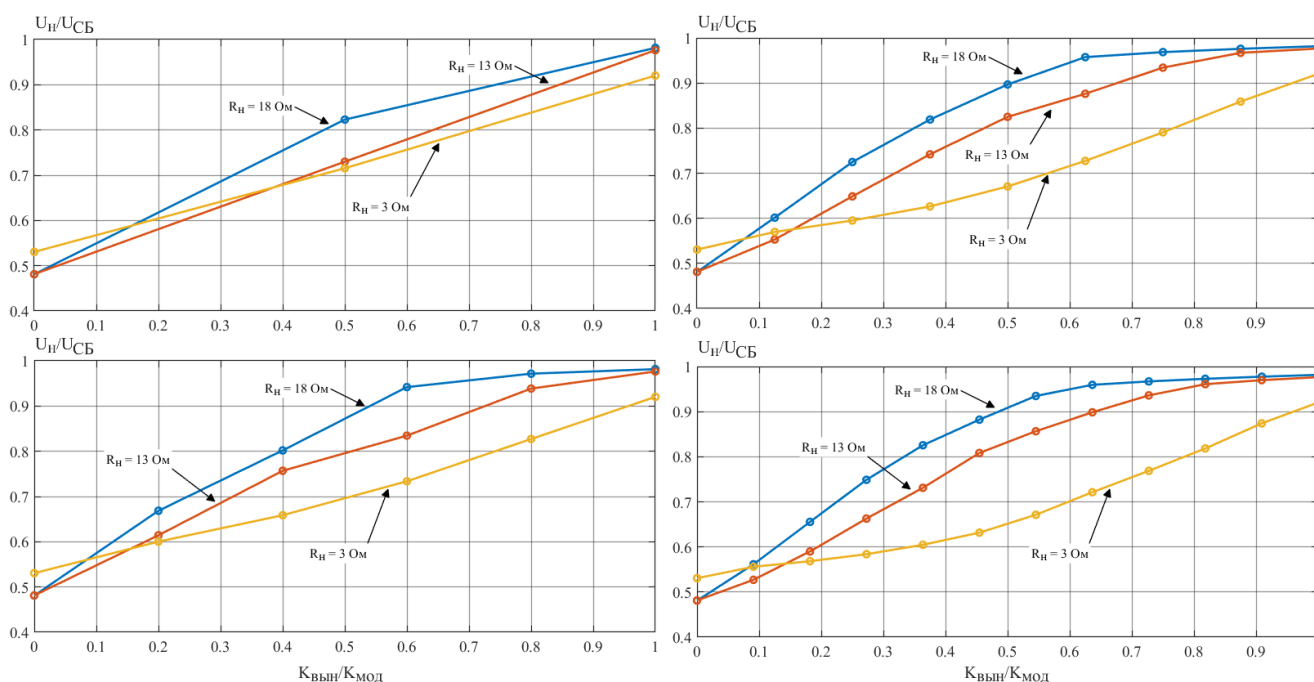


Рисунок 4 – Зависимость регулировочной характеристики резонансного бестрансформаторного преобразователя с однополярным кодово-импульсным регулированием от изменения $K_{мод}$

Для получения функции КПД, представим мощность нагрузки как разницу между мощностью СБ и потерями на активном сопротивлении, приняв допущение, что средний ток колебательного контура равен току СБ. В таком случае, учитывая только активные потери мощности, формула КПД примет вид:

$$\eta = \frac{U_{CB}(I_{CB}) \cdot I_{CB} - R_{посл} \cdot I_{CB}^2}{U_{CB}(I_{CB}) \cdot I_{CB}} \quad (6)$$

Совместив (4) и (6), получим зависимость КПД от параметров СЭП МКА

$$\eta = 1 - I_{CB} \cdot R_{посл} \cdot \frac{1 - \frac{1}{2} \cdot e^{\frac{K_{вын}}{K_{мод}} \cdot \frac{1}{Q_{комт}(R_n)}} - \frac{I_n(I_{CB}) \cdot R_{посл}}{U_{CB}(I_{CB})}}{U_n(K_{вын}, K_{мод}, I_{CB}, R_n)} \quad (7)$$

В третьей главе рассматривается методика проектирования СЭП МКА на основе РБП с ОКИР. График энергопотребления нагрузки МКА на орбитальном витке (рисунок 5) можно описать суммой прямоугольных импульсных функций P_{ni} за интервалы ΔT_i . Кроме того, вводятся следующие определения:

- постоянная мощность нагрузки $P_{пост}$.
- средневитковая мощность нагрузки $P_{ср_витк}$, величина которой может отличаться между смежными витками, в течение САС, но всегда больше $P_{пост}$. Мощность $P_{ср_витк}$ определяется потребляемой за один виток мощности, включающему в себя работу двигателей коррекции, коммутацию полезной нагрузки, заряд/разряд АБ и т.д.

$$P_{ср_витк} = \frac{1}{T_{витк}} \int_0^{T_{витк}} P_n = \sum_{i=1}^n \frac{P_{ni} \cdot \Delta T_i}{T_{витк}}, \quad (8)$$

$$P_{ni} = \begin{cases} (P_{пост} + P_i), & \text{при } \Delta T_i \in [T_i, T_{i+1}] \\ 0, & \text{при } \Delta T_i \notin [T_i, T_{i+1}] \end{cases} \quad (9)$$

- импульсная мощность нагрузки $P_{имп}$, величина которой является максимально допустимой при работе СЭП. Мощность $P_{имп}$ всегда больше $P_{ср_витк}$ и рассчитывается из наихудших условий работы КА.

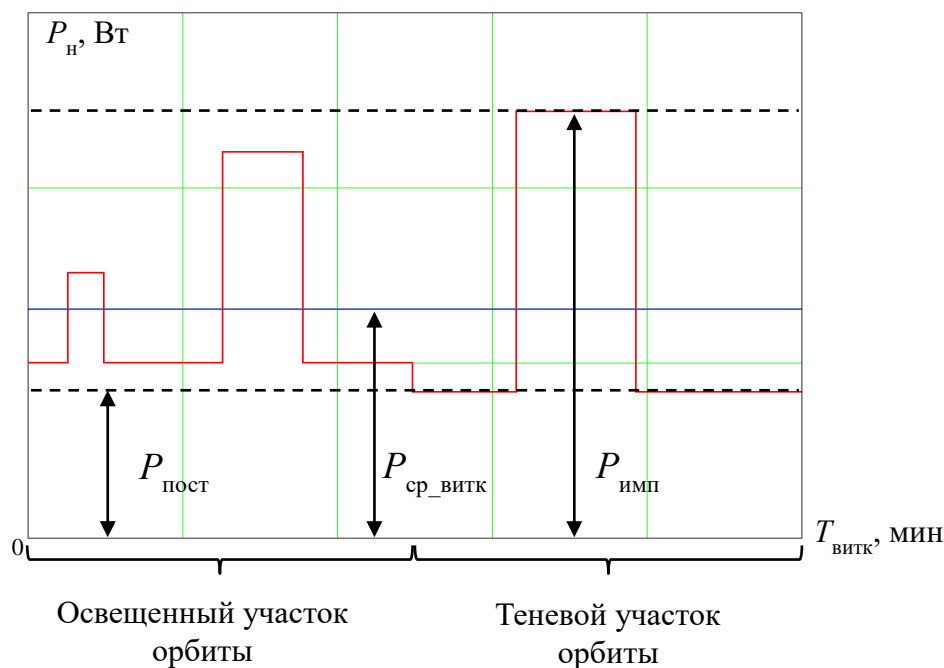


Рисунок 5 – Характер энергопотребления нагрузки на орбитальном витке

Методику проектирования можно представить в виде алгоритма (рисунок 6), считая, что СБ является плоской, равномерной освещенной и нагретой. Используя рассчитанную ВАХ и ВВХ СБ формируются требования к силовым элементам, такие как максимальные напряжения и токи транзисторов и диодов. Анализ полученных характеристик показывает, что к концу срока активного существования МКА электрические характеристики СБ снижаются практически вдвое, что приводит к значительному завышению габаритной мощности элементов.

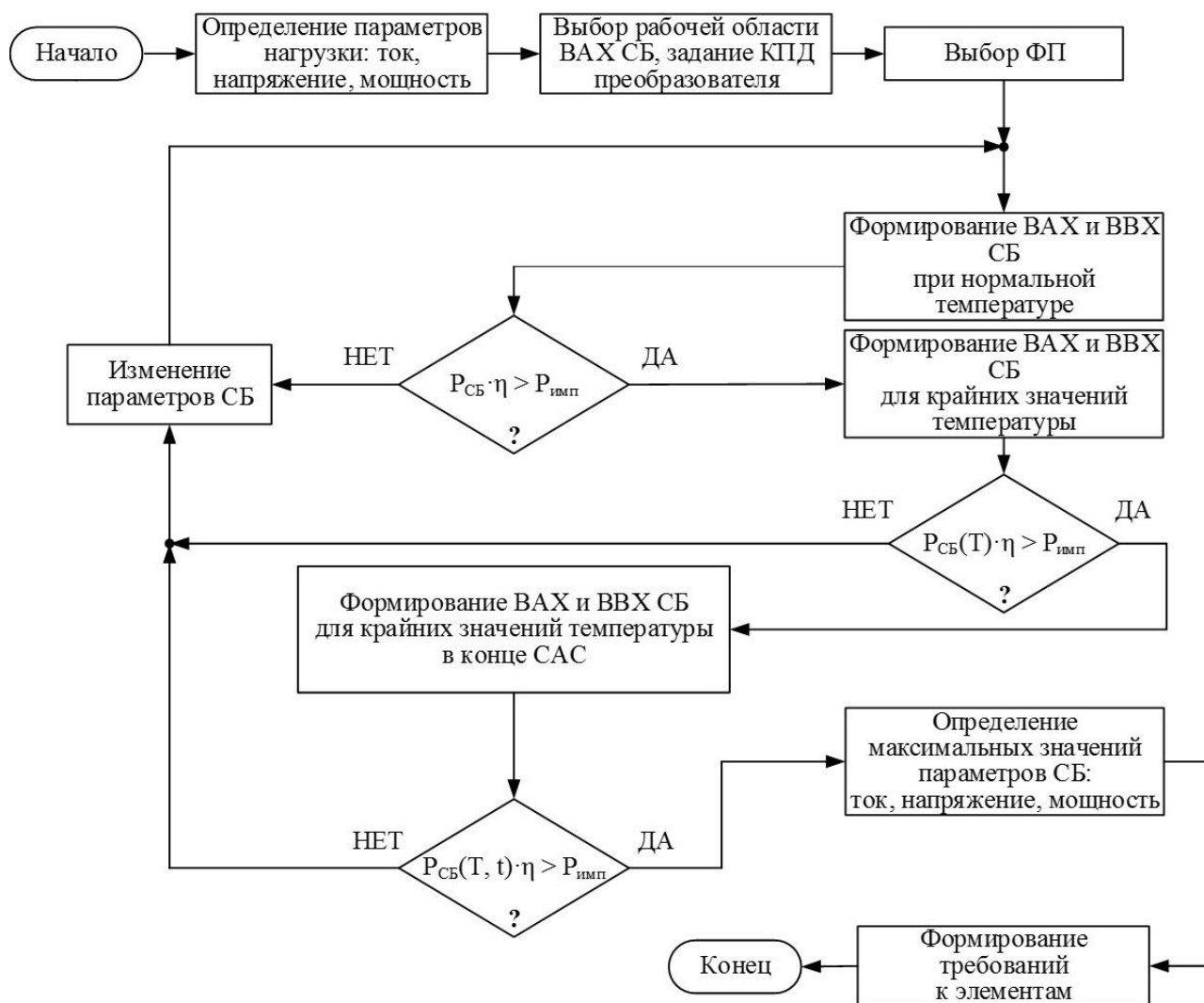


Рисунок 6 – Алгоритм расчета солнечной батареи для системы электропитания малого космического аппарата

Расчет КПД СЭП в режиме прямой передачи энергии и заряде АБ, как в самом нагруженном, требует учета неравномерного распределения токов между ветвями VT1-VT3 и VT2-VT4-VD2:

$$\Delta P = \begin{cases} I_{CB}^2 \cdot (R_{VT1} + R_{VT3}), & \text{если } I_{CB} \cdot (R_{VT1} + R_{VT3}) < U_{VD2пр}; \\ I_1^2 \cdot (R_{VT1} + R_{VT3}) + I_2^2 \cdot (R_{VT2} + R_{VT4}) + I_2 \cdot U_{VD2пр} (I_{VD2пр}), \\ \text{если } I_{CB_MM} \cdot (R_{VT1} + R_{VT3}) \geq U_{VD2пр} (I_2) + I_2 \cdot (R_{VT2} + R_{VT4}); \\ I_1 = \frac{U_{VD2пр} + (I_{CB} - I_1) \cdot (R_{VT2} + R_{VT4})}{R_{VT1} + R_{VT3}}, & \text{ток VT1-VT3}; \\ I_2 = I_{CB} - I_1, & \text{ток VT2-VT4-VD2.} \end{cases} \quad (10)$$

Используя (10) совместно с рассчитанной экспоненциальной ВАХ СБ, можно вычислить величину снижения потерь мощности в режиме прямой передачи энергии (рисунок 7).

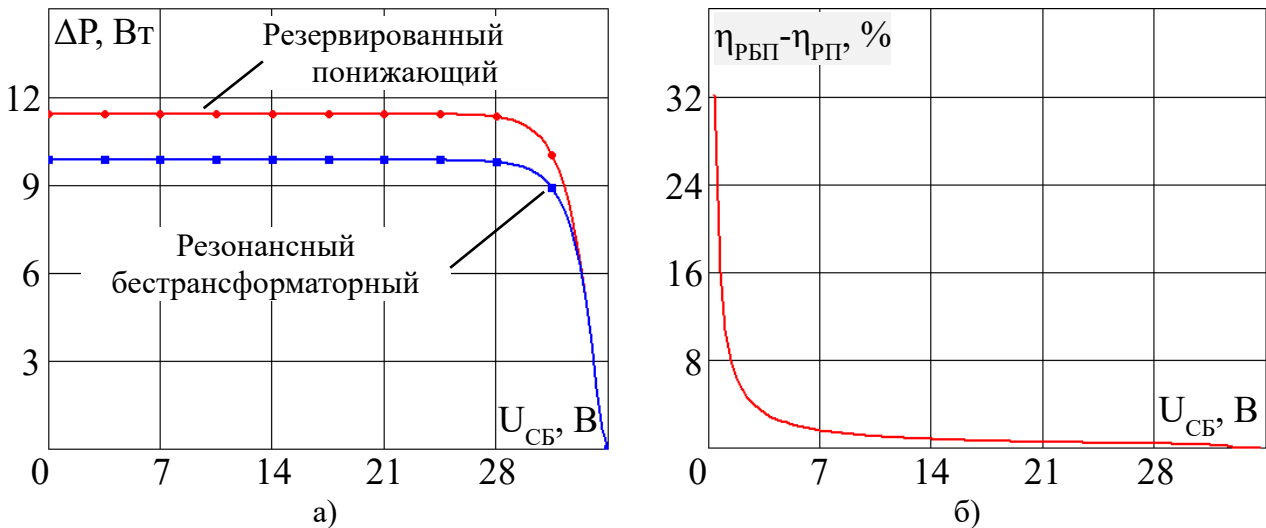


Рисунок 7 – Энергетические характеристики в режиме прямой передачи энергии: а) потери мощности; б) разница между КПД резонансного бестрансформаторного и резервированного понижающего преобразователей.

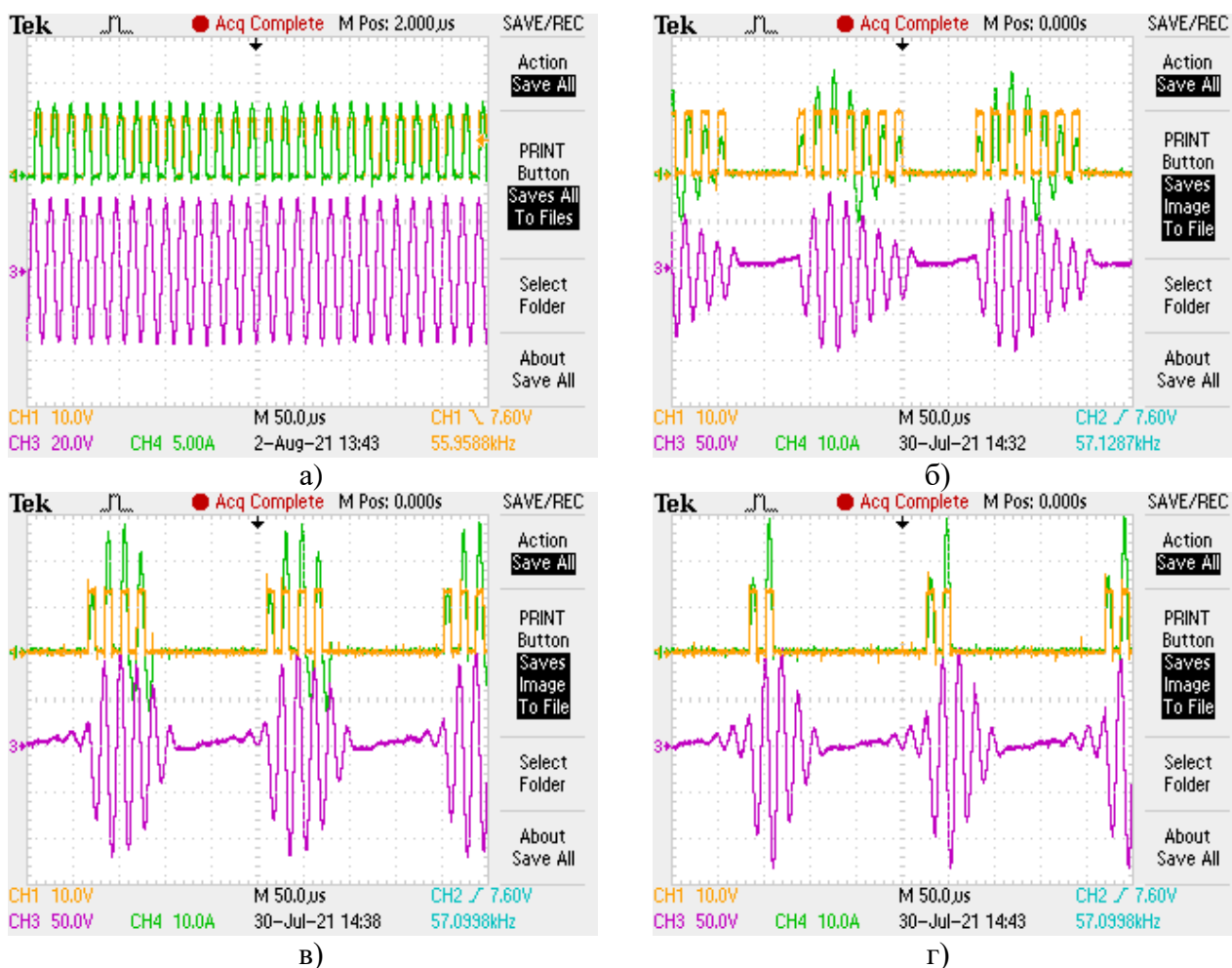
Дополнительной особенностью резонансных преобразователей, требующих учета при выборе элементов, является зависимость токов и напряжений элементов колебательного контура от добротности. Для мостовых резонансных преобразователей с последовательным колебательным контуром, зависимость имеет вид $U_{Срез} = Q_{конт} \cdot U_{вх}$. Для РБП с ОКИР, в режиме регулирования выходного напряжения, с учетом соотношения волнового сопротивления контура к нагрузке, напряжение на конденсаторе равно

$$U_{Срезмакс} = [U_{СБ_XX} - U_{СБ}(I_H)] \cdot Q_{конт} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{VT}}{R_H} + Q_{конт}\right), \quad (11)$$

принимая вид $f(x) = x^2 + x$, обеспечивая значительное превышение максимального напряжения конденсатора колебательного контура над напряжением холостого хода СБ (до $U_{Срезмакс} > 400$ В при $U_{Hмакс} = 34$ В, $U_{СБХХмакс} = 60$ В, $Q_{конт} = 4$).

В четвертой главе проведена верификация данных, полученных аналитически и с помощью имитационного моделирования. Приведенные осциллограммы работы РБП с ОКИР показывают сохранение режима НДК всех транзисторов в диапазоне нагрузок [$P_{\text{пост}}$; $P_{\text{имп}}$].

Осциллограммы тока транзистора при смене КК (рисунок 8), в режиме регулирования выходного напряжения, демонстрируют сохранение режима НДК в диапазоне от $1/K_{\text{мод}}$ до 1. Как видно из рисунков, с уменьшением КК происходит значительное повышение напряжения на конденсаторе колебательного контура (в 4,7 раз, от 30 до 140 В), а также формирование участков прерывистого тока, обусловленные быстрым разрядом конденсатора колебательного контура.



CH1 – напряжение на затвор-источке транзистора VT2

CH3 – напряжение конденсатора колебательного контура;
 CH4 – ток стока транзистора VT2.

Рисунок 8 – Осциллограммы тока и напряжений преобразователя в режиме регулирования выходного напряжения

Графики КПД СЭП в режиме прямой передачи энергии (рисунок 9) и регулирования выходного напряжения (рисунок 10) демонстрируют достаточную сходимость между собой результатов моделирования и макетного исследования, что позволяет утверждать о корректности полученных результатов.

В процессе исследования, с помощью тепловизора, были измерены температуры силовых элементов РБП с ОКИР в режиме прямой передачи энергии и заряда АБ, а также в режиме регулирования выходного напряжения. Контроль температуры элементов показал, что температура полупроводниковых элементов не превышает плюс 40 °С при температуре печатной платы плюс 35 °С. Наибольший нагрев продемонстрировали элементы колебательного контура, в частности максимальная температура резонансных дросселей достигала плюс 50 °С, увеличиваясь до плюс 90 °С при $K_{\text{вын}}/K_{\text{мод}} \rightarrow 0$, что связано с низкой добротностью контура (волновое сопротивление 4,1 Ом) при высоком значении $K_{\text{мод}} = 11$.

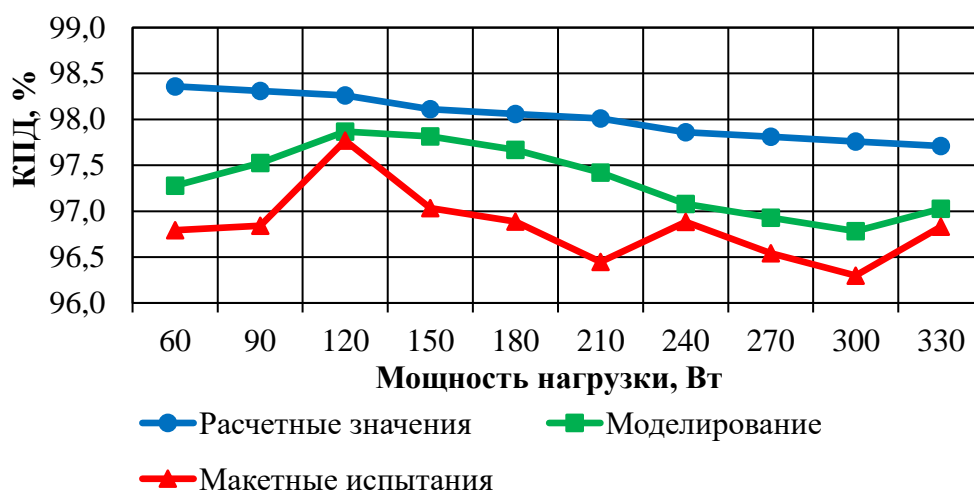


Рисунок 9 – КПД в режиме прямой передачи энергии и заряда АБ

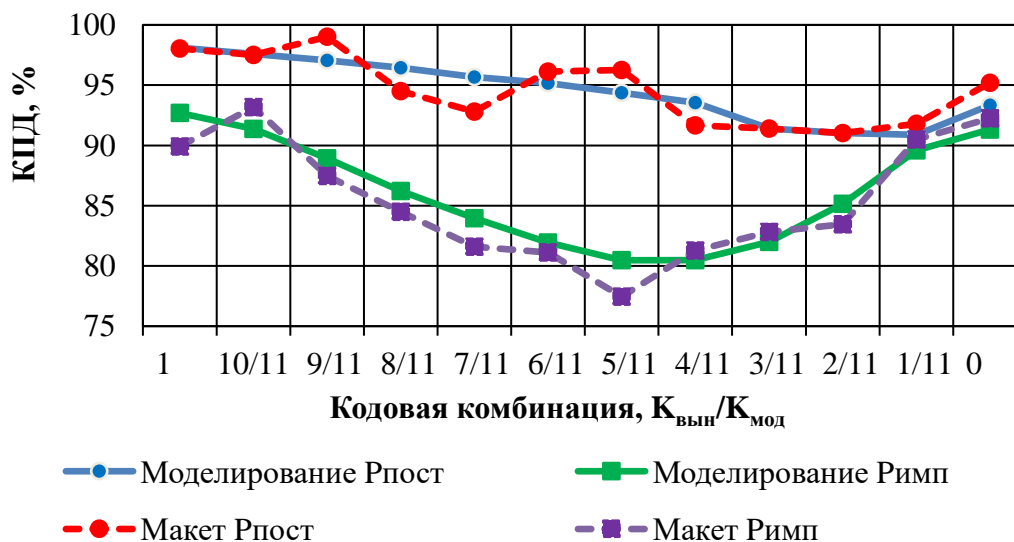


Рисунок 10 – КПД в режиме регулирования выходного напряжения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования была достигнута цель по синтезу энергоэффективной СЭП МКА на основе резервированного резонансного преобразователя. К основным результатам можно отнести:

1. Создание энергоэффективной СЭП МКА, удовлетворяющей основным требованиям по электрическим, надежностным и массогабаритным характеристикам. Показано, что существующая построение ЭПК на основе непосредственных и инверторно-трансформаторных преобразователей в значительной степени ограничено необходимостью резервирования силовых элементов.

2. Предложена схема РБП, позволяющая обеспечить передачу энергии СБ в нагрузку при единичном отказе произвольного элемента. Предложенный преобразователь позволяет снизить потери мощности на 14 %, при токах нагрузки более 12 А в наиболее нагруженном режиме, при минимальном напряжении нагрузки 24 В и мощности нагрузки 290 Вт.

3. Разработан алгоритм ОКИР, позволяющий обеспечить регулирование выходного напряжения без формирования фазового сдвига между первыми гармониками тока и напряжения колебательного контура. Особенностью алгоритма является ограничение диапазона регулирования выходного напряжения $[0,5 \cdot U_{вх}; U_{вх}]$.

4. Для РБП, в режиме регулирования выходного напряжения, получены зависимости регулировочной характеристики и КПД от параметров колебательного контура, точности регулирования выходного напряжения и величины нагрузки. Получены значения КПД макетного образца РБП для диапазона мощности нагрузки 66...330 Вт как в режиме прямой передачи энергии, так и в режиме регулирования выходного напряжения.

5. Сформирована методика расчета требований к элементам энергопреобразующей аппаратуры с учетом изменения параметров СБ, параметров нагрузки и характеристик колебательного контура. Из приведенной методики видно, что для применения в РБП транзисторов с $U_{СИ\max} = 60$ В, при $K_{ОН} = 0,75$, максимальное напряжение ХХ СБ не должно превышать 45 В.

6. Приведены расчетные соотношения для выбора основных характеристик элементов (добротности колебательного контура, $R_{СИ}$, $U_{VDпр}$ и т.п.) РБП с ОКИР в зависимости от требуемых энергетических характеристик – КПД, точности стабилизации, максимального напряжения нагрузки.

7. Изготовлен макетный образец РБП с ОКИР с последовательно сменяемыми КК, с возможностью фиксации комбинации, и проведена верификация результатами экспериментального исследования.

К рекомендациям и перспективам дальнейшей разработки темы необходимо отнести следующие задачи:

1. Исследование динамических характеристик СЭП МКА на основе РБП с ОКИР.

2. Оптимизация полупроводниковых элементов РБП по критериям минимальной массы, максимального КПД и надежности.

3. Модификация колебательного контура для снижения габаритной мощности элементов, при сохранении высокой добротности и малого тепловыделения.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ***В ведущих рецензируемых изданиях из Перечня ВАК:***

1. **Журавлев И. М.** Резонансный преобразователь энергии солнечной батареи в системе электропитания малого космического аппарата / И. М. Журавлев, А. В. Осипов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 23, № 3. – С. 81-85. – DOI 10.21293/1818-0442-2020-23-3-81-85. – EDN UZOWKH.
2. **Журавлев И. М.** Резонансные преобразователи постоянного напряжения с кодо-импульсным регулированием / А. В. Осипов, И. М. Журавлев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2020. – Т. 23, № 2. – С. 97-102. – DOI 10.21293/1818-0442-2020-23-2-97-102. – EDN VXCCQL.
3. Алгоритмы управления многоканальным шунтовым стабилизатором напряжения с цифровой системой автоматического управления / А. С. Асочаков, А. А. Дружинин, **И. М. Журавлев**, А. А. Лопатин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2021. – Т. 24, № 2. – С. 84-90. – DOI 10.21293/1818-0442-2021-24-2-84-90. – EDN OCLNFE.
4. **Журавлев И. М.** Оценка влияния напряжения стабилизации и характеристик солнечной батареи на токовую нагрузку транзистора шунтового стабилизатора / Д. О. Дударьков, М. Е. Хлыстунов, И. М. Журавлев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2022. – Т. 25, № 2. – С. 75-81. – DOI 10.21293/1818-0442-2022-25-2-75-81. – EDN XYSQNU.
5. **Журавлев И. М.** Анализ связи величины токовой нагрузки транзисторного ключа шунтового преобразователя энергии от параметров схемы и характеристик солнечной батареи / А. Г. Струговец, Е. И. Крутских, И. М. Журавлев // Практическая силовая электроника. – 2022. – № 1(85). – С. 42-46. – EDN NWBBES.
6. Оценка параметров солнечной батареи при проектировании устройств преобразования энергии космического аппарата / А. Г. Струговец, **И. М. Журавлев**, М. Е. Хлыстунов, В. Е. Хлыстунов // Практическая силовая электроника. – 2022. – № 3(87). – С. 38-43. – EDN ZAAXKS.
7. Комплексный алгоритм проектирования энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов / **И. М. Журавлев**, И. Е. Лысенко, М. Е. Хлыстунов, Д. О. Дударьков, А. Г. Струговец // Вестник чувашского университета. – 2023. – 4. – С. 85-98.
8. **Журавлев И. М.** Зарядное устройство аккумуляторной батареи космического аппарата на основе двухтактного понижающего преобразователя напряжения с трансформаторными датчиками тока / М. Е. Хлыстунов, И. М. Журавлев, А. Г. Струговец // Практическая силовая электроника. – 2023. – № 4(92). – С. 33-37.

В других изданиях:

9. Single-Cycle LCL-T Resonant Converter for Solar Battery / S. A. Zapolskiy, A. V. Osipov, **I. M. Zhuravlev**, M. E. Khlystunov // Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE) - proceedings APEIE - 2018 : 14TH INTERNATIONAL SCIENTIFIC- TECHNICAL CONFERENCE. In 8 Volumes, Novosibirsk, 02–06 октября 2018 года. Vol. Volume 1, Part 6. – Novosibirsk: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – P. 90-93. – DOI 10.1109/APEIE.2018.8545079. – EDNZPOUAN/

10. Вольтодобавочный резонансный преобразователь энергии солнечной батареи с активным выпрямителем / А. В. Осипов, **И. М. Журавлев**, М. Е. Хлыстунов, А. А. Лопатин // Решетневские чтения. – 2018. – Т. 1. – С. 297-299. – EDN YTEZBZ.

11. Резонансный инверторно-трансформаторный преобразователь энергии солнечной батареи с активным выпрямителем / **И. М. Журавлев**, А. В. Осипов, А. А. Лопатин, М. Е. Хлыстунов // IV Всероссийский молодежный конкурс научно-технических работ «Орбита Молодежи». – 2018.

12. Анализ требований к ЭКБ для нового поколения энергопреобразующей аппаратуры перспективных космических аппаратов / **И. М. Журавлев**, А. А. Лопатин, А. А. Дружинин, А. С. Асочаков, Р. А. Латыпов // 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули». – Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2019.

13. Однотактный резонансный LCL-T преобразователь энергии солнечной батареи / С. А. Запольский, А. В. Осипов, **И. М. Журавлев**, М. Е. Хлыстунов // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП - 2018 : ТРУДЫ XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ: В 8 ТОМАХ, Новосибирск, 02–06 октября 2018 года. Том 7. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2018. – С. 105-109. – EDN JMHGMM.

14. Анализ дискретных способов управления шунтовым преобразователем мощности солнечной батареи / А. Г. Струговец, М. Е. Хлыстунов, **И. М. Журавлев** // Решетневские чтения: Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях, Красноярск, 10–12 ноября 2021 года / Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Том Часть 1. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2021. – С. 346-348. – EDN HVVRIU.