

УДК 621.311

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ НА ОСНОВЕ РЕГУЛИРУЕМЫХ ИНВЕРТОРОВ ТОКА

Осипов Александр Владимирович,

канд. техн. наук, зав. лаб. НИИ автоматики и электромеханики
при Томском университете систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ossan@mail.ru

Шиняков Юрий Александрович,

д-р техн. наук, директор НИИ космических технологий Томского
университета систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: shua@main.tusur.ru

Отто Артур Исаакович,

мл. науч. сотр. НИИ космических технологий Томского университета
систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ottoai@mail.ru

Черная Мария Михайловна,

мл. науч. сотр. НИИ космических технологий Томского университета
систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: cmm91@inbox.ru

Ткаченко Александр Александрович,

канд. техн. наук, зав. отделом НИИ автоматики и электромеханики
при Томском университете систем управления и радиоэлектроники,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: ossan@mail.ru

Актуальность работы обусловлена необходимостью создания энергетически эффективной системы электропитания космического аппарата.

Цель работы: Синтез инверторно-трансформаторной структуры системы электропитания космического аппарата на основе инверторов тока, позволяющей реализовать режим максимального отбора мощности солнечной батареи при проектировании системы электропитания космического аппарата с любым выходным напряжением.

Методы исследования основаны на общих положениях теории электрических цепей, теории алгебраических уравнений, вычислительных методах и использовании современных инструментальных систем и методов математического моделирования.

Результаты: Предложена структура системы электропитания космического аппарата с суммированием выходных токов инверторов в общем узле, которая позволяет регулировать напряжение солнечной батареи в диапазоне, достаточном для реализации режима максимального отбора мощности. Получены регулировочные характеристики преобразователя при дрейфе вольт-амперной характеристики солнечной батареи и различных значениях нагрузки. Показано, что в системах суммирования тока положение рабочей точки вольт-амперной характеристики солнечной батареи не зависит от мощности нагрузки.

Ключевые слова:

Система электропитания космического аппарата, инвертор тока, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, экстремальное регулирование мощности.

Введение

Одной из основных задач, возникающих при проектировании систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) является согласование уровней напряжения нагрузки с напряжениями используемых в СЭП источников питания, солнечной (СБ) и аккумуляторной батареи (АБ). Учитывая, что СБ имеет нелинейные вольт-амперную (ВАХ) и вольт-ваттную (ВВХ) характеристики с ярко выраженным максимумом мощности, преобразователь желательно проектировать таким образом, чтобы диапазон регулирования напряжения СБ охватывал точку максимума ВВХ [1]. Однако в

СЭП большой мощности с выходным напряжением 100 В в настоящее время наибольшее распространение получила шунтовая схема преобразователя (повышающая схема преобразователя постоянного напряжения), которая не может формировать напряжение на СБ более 100 В, в результате чего точка максимума мощности ВАХ при низких температурах СБ может оказаться неохваченной [2, 3]. Кроме того, работа на токовом участке ВАХ СБ вызывает значительные пульсации её напряжения и уменьшает фильтрующие свойства дросселя повышающего преобразователя. Установка конденсаторов на входе преобразователя приводит к возник-

кновению ограниченных параметрами СБ низкочастотных колебаний входного напряжения и тока, которые могут быть демпфированы установкой согласованного фильтра [4].

Желание реализовать режим максимального отбора мощности на всем цикле работы СЭП КА при произвольно заданном выходном напряжении приводит к появлению преобразователей на основе инверторно-трансформаторных схем [5–7]. В этом случае уровни напряжения источников произвольно согласовываются с нагрузкой коэффициентами трансформации, что позволяет применять первичные источники питания СБ и АБ с любыми напряжениями. При этом важным вопросом является выбор способа суммирования энергии первичных источников, которое может осуществляться как на основе суммирования напряжений инверторов в общем контуре, так и путем суммирования токов инверторов в общем узле [5].

При применении преобразователей с суммированием напряжений источников вторичные обмотки трансформаторов включаются последовательно, значение выходного напряжения определяется суммой выходных напряжений инверторов, регулируемых фазовым способом. Применительно к СЭП такая структура подробно рассмотрена в [5], отмечено, что главная проблема реализации заключается в зависимости соотношения суммируемых напряжений от нагрузки, что требует быстродействующего контура регулирования преобразователем.

Инверторные схемы с суммированием токов, имеющие параллельное включение вторичных обмоток трансформаторов, лишены этого недостатка, так как суммируются именно токи инверторов, а амплитуды выходных напряжений инверторов тока равны напряжению питания. Однако имеется ряд сложностей, связанных с проектированием необходимых в этом случае инверторов тока, заключающихся в установке последовательно с транзисторами инвертора блокирующих диодов. Существует вариант реализации суммирования токов инверторов напряжения на одном многообмоточном трансформаторе [6], такая схема позволяет стабилизировать напряжение на нагрузке, однако не позволяет регулировать напряжение СБ из-за ее параллельного включения с АБ через трансформатор.

Настоящая работа посвящена синтезу энергетически эффективного инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока для СЭП КА и исследованию его характеристик и режимов работы.

Инверторно-трансформаторный преобразователь с суммированием токов солнечной и аккумуляторной батареи на основе инверторов тока и анализ его характеристик

Исходя из топологии схемы суммирования токов, источники СЭП целесообразно преобразовывать в источники тока и, соответственно, применять инверторы тока, имеющие ключи с односто-

ронней проводимостью и двусторонней блокировкой, т. е. имеющие последовательно включенный с транзистором блокирующий диод. Установка диодов необходима для исключения закорачивания напряжения соседнего инвертора при реализации режима выхода тока инвертора из узла суммирования, который реализуется отпиранием транзисторов, образующих стойку инвертора, и закорачиванием входного источника. При этом установка диодов приводит к существенному снижению КПД инвертора.

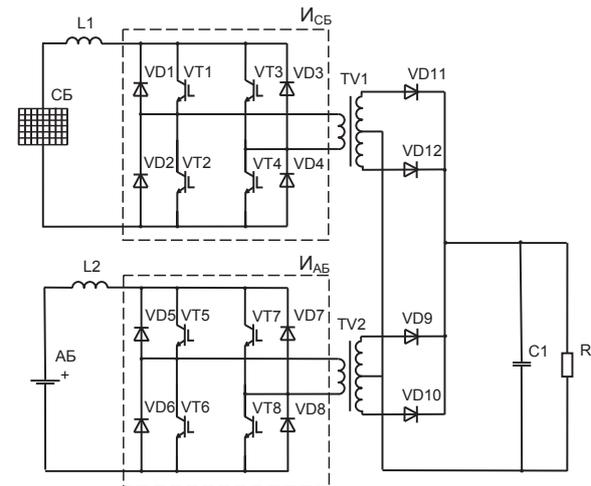


Рис. 1. СЭП с суммированием токов выпрямителей в общем узле на основе инверторов тока

Для суммирования токов предлагается вариант СЭП КА с суммированием выходных токов выпрямителей, что позволяет избежать установки в инвертор блокирующих диодов и реализовывать его по классической схеме инвертора напряжения (рис. 1), в такой схеме отпирание транзисторов стойки одного из инверторов не приводит к закорачиванию выходного напряжения соседнего инвертора.

В представленной схеме работа инверторов основана на принципе повышающего преобразователя, который заключается в формировании на такте управления преобразователем двух интервалов, интервала накопления тока во входных дросселях, на котором открыты транзисторы одной из стоек инвертора, и интервала передачи тока в нагрузку, на котором открыты транзисторы одной из диагоналей инвертора. Данный принцип управления может быть реализован путем фазового сдвига управляющих импульсов транзисторов верхней пары инвертора относительно нижней на определенный угол, определяющий относительную длительность импульса выходного тока инвертора, которая связывает выходные параметры преобразователя с входными

$$U_H = \frac{U_{СБ}}{\gamma_{СБ} K_{тр,СБ}} = \frac{U_{АБ}}{\gamma_{АБ} K_{тр,АБ}},$$

$$I_H = K_{тр,СБ} \gamma_{СБ} I_{СБ} + K_{тр,АБ} \gamma_{АБ} I_{АБ}, \quad (1)$$

где I_H , U_H – ток и напряжение нагрузки; $I_{СБ}$, $U_{СБ}$, $I_{АБ}$, $U_{АБ}$ – токи и напряжения источников; $\gamma_{СБ}$, $\gamma_{АБ}$ –

относительные длительности импульсов тока инверторов. Из соотношений видно, что напряжение нагрузки может стабилизироваться инвертором И_{АБ}, в то время как инвертор И_{СБ} регулирует входное напряжение СБ.

Питание нагрузки заданным напряжением в преобразователе, построенном по этой структуре, может быть реализовано при различных соотношениях токов, потребляемых от первичных источников СБ и АБ. Так, при фазовом сдвиге управляющих импульсов верхней пары транзисторов инвертора И_{СБ} относительно нижней на угол $\alpha_{СБ} \approx \pi$ длительность импульсов его выходного тока $\gamma_{СБ} \rightarrow 0$, поэтому нагрузку полностью питает АБ, ток СБ закорочен инвертором и исключен из узла суммирования, поэтому $I_{СБ} \rightarrow I_{КЗ}$, $U_{СБ} \rightarrow 0$. По мере увеличения длительности импульсов $\gamma_{СБ}$ инвертор И_{СБ} начинает генерировать ток в узел суммирования, что компенсируется уменьшением тока, генерируемого инвертором И_{АБ}, баланс мощности смещается в сторону потребления энергии от СБ. Напряжение на СБ увеличивается, но не достигает точки с максимальной мощностью $0 < U_{СБ} < U_{опт}$, т. е. СБ по-прежнему недоиспользуется. Максимальное использование СБ достигается при некотором значении $\gamma_{СБопт}$, при котором напряжение на СБ увеличивается до $U_{опт}$, в результате чего СБ передает в нагрузку максимальное значение мощности, что приводит к максимальному уменьшению мощности, потребляемой от АБ. Такой режим энергетически наиболее эффективен. Поэтому в представленной структуре предполагается следующий режим работы. Инвертор И_{СБ} регулирует напряжение на СБ и соответственно положение рабочей точки ее ВАХ таким образом, чтобы получить максимальную мощность, т. е. работает в режиме экстремального регулирования мощности СБ, а инвертор И_{АБ} осуществляет стабилизацию напряжения на нагрузке, обеспечивая необходимую добавку тока, при этом длительность импульсов управления АБ инвертора $\gamma_{АБ}$ будет определяться только напряжением $U_{АБ}$.

Коэффициенты трансформации в такой структуре можно рассчитать исходя из того, что каждый из первичных источников должен питать нагрузку автономно

$$K_{тр_СБ} = \frac{U_{СБ_max}}{U_H},$$

$$K_{тр_АБ} = \frac{U_{АБ}}{U_H}. \quad (2)$$

Следует отметить, ВАХ СБ не является постоянной и существенно зависит от температуры, которая может изменяться в широких пределах, остывая на теневом участке орбиты и нагреваясь на освещенном. Поэтому для определения характеристик схемы суммирования токов необходима математическая модель СБ, приемлемую точность обеспечивает следующее выражение [8]

$$I_{СБ} = I_{КЗ} \left(1 - \left(1 - \frac{I_{опт}}{I_{КЗ}} \right)^{\frac{U_{ХХ} - U_{СБ}}{U_{ХХ} - U_{опт}}} \right), \quad (3)$$

на основе которого для солнечной панели КСМ-160 с параметрами $U_{ХХ1}=52,46$ В, $I_{КЗ}=4,78$ А, $U_{опт1}=43,1$ В, $I_{опт}=4,3$ А при -30 °С и параметрами $U_{ХХ2}=40,7$ В, $I_{КЗ}=4,78$ А, $U_{опт2}=33,2$ В, $I_{опт}=4,3$ А при $+40$ °С получены ВАХ и ВВХ, представленные на рис. 2.

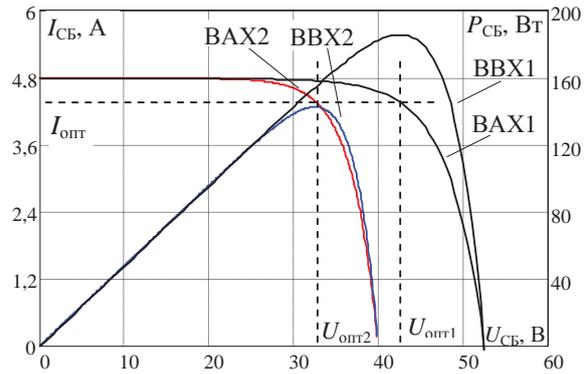


Рис. 2. Характеристики фотоэлектрических панелей КСМ-160 при -30 и $+40$ °С

Путем решения в MathCad уравнений (1)–(3) для солнечной панели КСМ-160 с ВАХ (рис. 2) получены регулировочные характеристики при стабилизации напряжения $U_H=100$ В, напряжении АБ $U_{АБ}=24$ В, коэффициенты трансформации выбраны по условию (2), т. е. $K_{тр_СБ}=0,431$, $K_{тр_АБ}=0,24$. Характеристики представлены на рис. 3 при различных мощностях нагрузки и показывают, что дрейф напряжения оптимальной точки ВАХ СБ требует пропорционального изменения длительности импульсов тока СБ инвертора $\gamma_{СБ}$, при этом изменение мощности нагрузки не требует регулирования, перераспределение токов источников происходит без изменения $\gamma_{СБ}$ и $\gamma_{АБ}$.

При мощностях нагрузки меньших максимальной мощности СБ, ($P_H < P_{СБ}$) в СЭП наблюдается избыток мощности, что отражается на характеристиках в виде участка с отрицательным значением мощности АБ, что говорит о ее заряде энергией СБ. Однако в схеме рис. 1 этот режим невозможен из-за диодов выпрямителя, что не позволяет осуществить рекуперацию энергии в АБ. Реализовать режим рекуперации энергии, т. е. заряд АБ напряжением нагрузки можно только при условии введения в схему реверсивного выпрямителя по схеме рис. 4.

В представленной схеме при уменьшении тока, потребляемого с АБ, до нуля транзисторы VT5–VT8 закрываются, а транзисторы VT9, VT10, поочередно замыкаясь, формируют на обмотках трансформатора TV2 переменное напряжение, которое после выпрямления диодами VD5–VD8 и сглаживания дросселем L2 создает требуемый зарядный ток АБ. Такое построение СЭП позволяет совместить зарядное и разрядное устройства и за

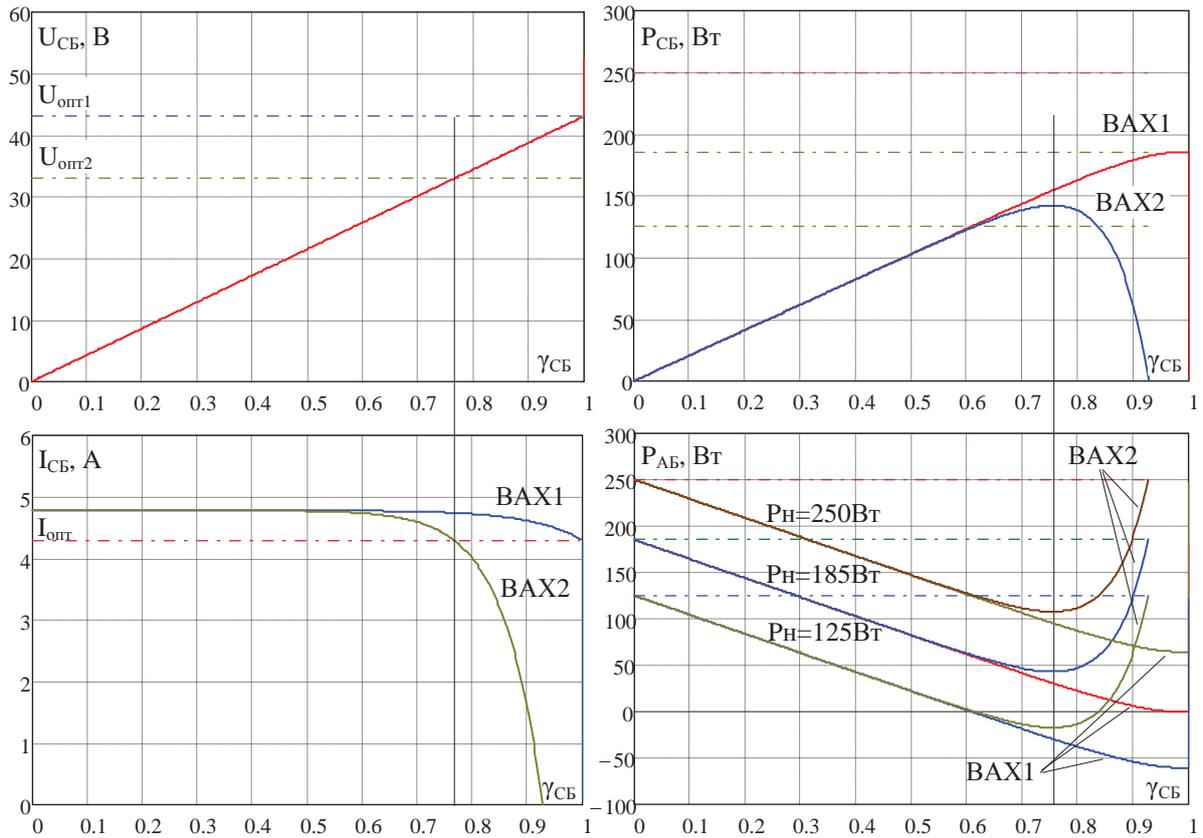


Рис. 3. Характеристики инверторно-трансформаторного преобразователя с суммированием токов при $U_H=100\text{ В}$, $U_{AB}=24\text{ В}$, на панели КСМ-160 при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ с коэффициентами трансформации $K_{\text{тр}_CB}=0,431$, $K_{\text{тр}_AB}=0,24$

счет этого уменьшить массогабаритный показатель СЭП. Однако передача энергии в процессе заряда через два инвертора и два выпрямителя снижает КПД. Увеличить КПД можно формированием дополнительного непосредственного канала передачи энергии от СБ к АБ. Таким образом, при проектировании СЭП всегда присутствует поиск компромисса между КПД и массогабаритным показателем.

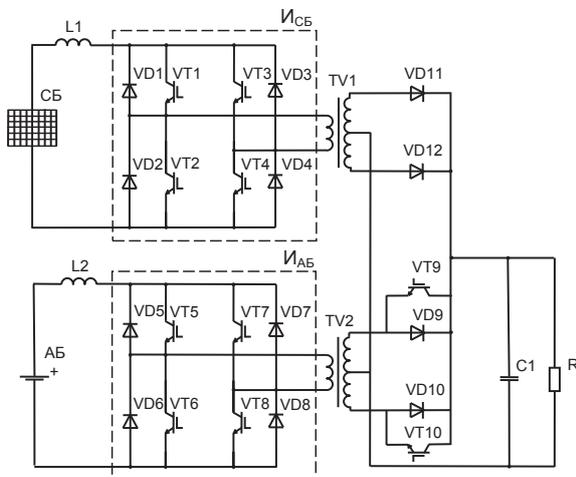


Рис. 4. СЭП на основе инверторов тока с суммированием токов в общем узле и реверсивным выпрямителем

Моделирование инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока

Моделирование инверторно-трансформаторного преобразователя на инверторах тока проведено в среде Orca9.2. Инверторы реализованы на идеальных ключах с двухсторонней проводимостью, частота коммутации 50 кГц. Параметры фильтра: индуктивность входного дросселя инвертора $L=100\text{ мкГн}$, емкость выходного конденсатора $C=50\text{ мкФ}$. Коэффициенты трансформации выбраны согласно данным рекомендациям $K_{\text{тр}_CB}=0,5$, $K_{\text{тр}_AB}=0,33$. Напряжение нагрузки $U_H=100\text{ В}$, напряжение аккумуляторной батареи постоянно $U_{AB}=24\text{ В}$, модель солнечной батареи КСМ-160 задавалась по точкам табличным способом по данным ВАХ (рис. 2). Результаты моделирования преобразователя с СБ КСМ-160 при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различных нагрузках представлены на рис. 5.

На рис. 6, а представлен случай недостатка вырабатываемой СБ мощности $P_H > P_{CB}$ при работе СБ в точке ВАХ с максимальной мощностью. Выходное напряжение $U_H=100\text{ В}$ стабилизируется инвертором I_{AB} при $\gamma_{AB}=0,73$, инвертор I_{CB} регулирует напряжение СБ по условию ее максимальной мощности, которая достигнута при $\gamma_{CB}=0,86$, значения совпадает с расчетными по выражению (1). Нагрузка потребляет от СБ максимальную мощность, недостаток компенсируется за счет АБ.

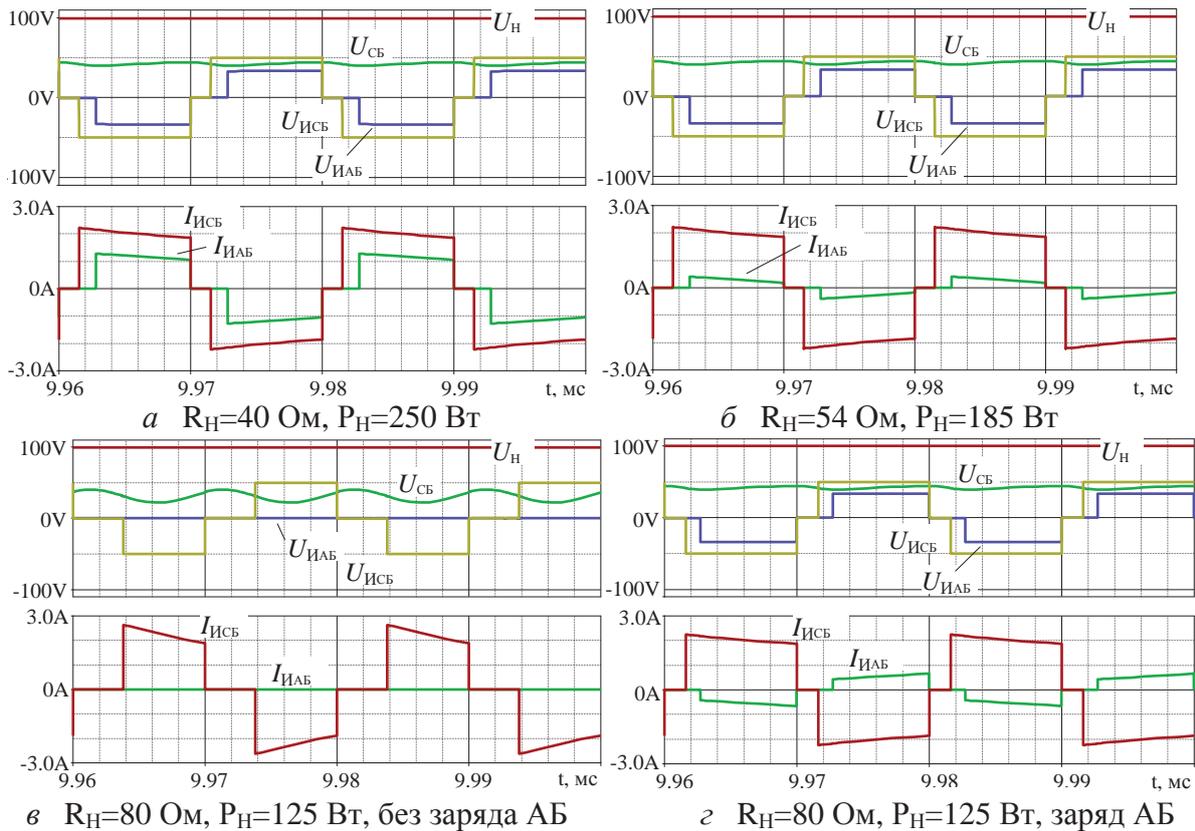


Рис. 5. Результаты моделирования инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока при СБ КСМ-160 при температуре $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различных нагрузках

При равенстве мощностей $P_{\text{H}}=P_{\text{СБ}}$ (рис. 5, б) параметры инвертора $I_{\text{СБ}}$ не изменяются, выходной ток $I_{\text{СБ}}$ остается прежним, потребление с $I_{\text{АБ}}$ минимальное и компенсирует недобор мощности с СБ, вызванный пульсацией его напряжения. Длительности импульсов тока остались прежними.

При дальнейшем уменьшении мощности нагрузки $P_{\text{H}}<P_{\text{СБ}}$ возможно два случая: неиспользование избыточной мощности и заряд АБ избыточной мощностью. При неиспользовании избыточной мощности (рис. 5, в) транзисторы инвертора $I_{\text{АБ}}$ могут быть выключены, в результате чего его выходной ток равен нулю. Напряжение нагрузки в этом случае стабилизирует инвертор $I_{\text{СБ}}$, уменьшая длительность импульса тока до $\gamma_{\text{СБ}}=0,63$ и переходя на токовую ветвь ВАХ СБ. При этом отмечается увеличение пульсаций напряжения на АБ, что объясняется формой ВАХ СБ.

При заряде АБ избыточной мощностью (рис. 5, г) стабилизация напряжения на нагрузке достигается реверсом выходного выпрямителя инвертора $I_{\text{АБ}}$, длительность импульсов напряжения которого совпадает с прежней $\gamma_{\text{АБ}}=0,73$.

Таким образом, изменение нагрузки в данной схеме СЭП не требует изменения длительности импульсов тока инверторов, значение $\gamma_{\text{СБ}}=0,86$ меняется только при неиспользовании избыточной мощности (рис. 5, в).

Результаты моделирования преобразователя с СБ КСМ-160 при нагреве ВАХ СБ до температуры $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и различных нагрузках представлены на рис. 6.

Учитывая, что мощность оптимальной точки ВАХ уменьшилась, случай недостатка вырабатываемой СБ мощности $P_{\text{H}}>P_{\text{СБ}}$ представлен на рис. 6, а, б. Выходное напряжение $U_{\text{H}}=100\text{ В}$ стабилизируется инвертором $I_{\text{АБ}}$ при прежней длительности импульса $I_{\text{АБ}}$, т. е. при $\gamma_{\text{АБ}}=0,73$, что объясняется стабильностью $U_{\text{АБ}}$. Для достижения максимальной мощности СБ длительность импульса $I_{\text{СБ}}$ смещена до $\gamma_{\text{СБ}}=0,7$. Недостаток мощности компенсируется за счет АБ, при этом изменение нагрузки приводит лишь к изменению амплитуды тока АБ, длительности импульсов остаются прежними.

При уменьшении мощности нагрузки $P_{\text{H}}<P_{\text{СБ}}$ также возможно два случая: неиспользование избыточной мощности и заряд АБ избыточной мощностью. При неиспользовании избыточной мощности (рис. 6, в) процессы происходят аналогично рис. 5. Стабилизация напряжения нагрузки в этом случае достигнута $\gamma_{\text{СБ}}=0,63$.

Следует отметить, что во всех рассмотренных случаях амплитуда тока в инверторе $I_{\text{СБ}}$ не меняется $I_{\text{СБ}}\approx 2\text{ А}$, что говорит об отсутствии завышения габаритной мощности его транзисторов.

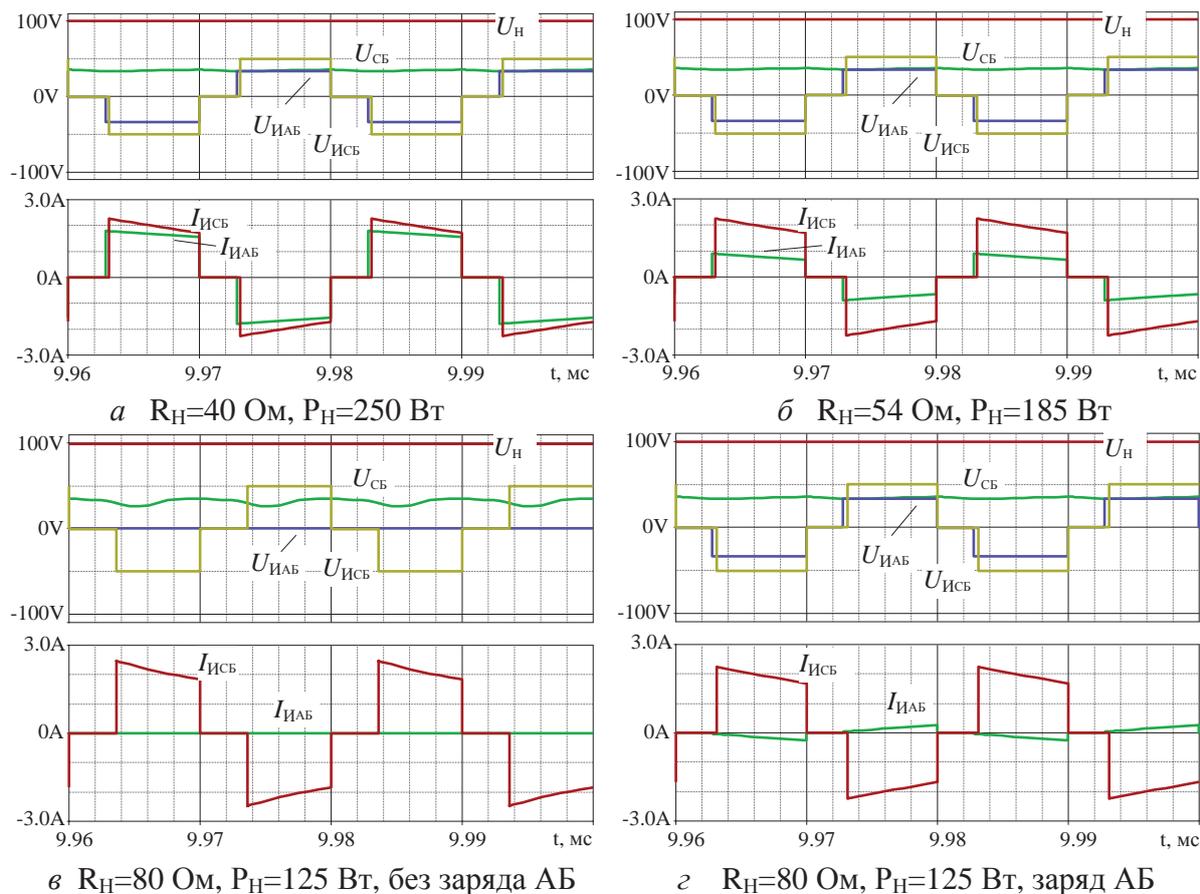


Рис. 6. Результаты моделирования инверторно-трансформаторного преобразователя на основе инверторов тока при СБ КСМ-160 при температуре +40 °С и различных нагрузках

Выводы

1. Применение в системах электропитания космических аппаратов инверторно-трансформаторных преобразователей на основе инверторов тока позволяет регулировать напряжение солнечной батареи в диапазоне от нуля до значения определяемого приведенной через трансформатор нагрузкой и реализовывать, таким образом, экстремальное регулирование мощности солнечных батарей при любых уровнях напряжения нагрузки и источников системы электропитания.
2. Полученные регулировочные характеристики преобразователя с суммированием токов (рис. 3) показали, что в отличие от преобразователей с суммированием напряжений в общем контуре [5], изменение нагрузки не требует регулирования токов инверторов $I_{СБ}$, $I_{АБ}$, что упрощает ре-

ализацию системы управления преобразователем. При дрейфе ВАХ солнечной батареи для сохранения режима максимальной мощности СБ необходимо пропорциональное изменение длительности импульсов тока $\gamma_{СБ}$.

3. Для реализации заряда АБ в структуре системы электропитания (рис. 1) необходим реверсивный выпрямитель в канале АБ (рис. 4), что уменьшает массогабаритный показатель за счет более полного использования элементов канала АБ, однако приводит к многократному преобразованию энергии в процессе заряда и уменьшению КПД.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований и экспериментальных разработок)» 2385.2014.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернышев, Ш.Н. Ислаев. – Новосибирск: ВО «Наука», 1994. – 318 с.
2. Mukund R. Patel. Spacecraft power systems. New York; Washington, D.C.: CRC Press, 691 p. URL: http://www.e-reading.co.uk/bookreader.php/135136/Patel_-_Spacecraft_Power_Systems.pdf (дата обращения: 13.01.2014).
3. Лесных А.Н., Сарычев В.А. Исследование высоковольтных систем электропитания космических аппаратов со стабилизаторами напряжения вольтодобавочного типа // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. – 2006. – № 6. – С. 63–66.
4. Система электроснабжения космического аппарата с интегрированным повышающим преобразователем напряжения / Ю.М. Казанцев, К.Г. Гордеев, А.Ф. Лекарев, А.М. Гаврилов // Вопросы электромеханики. – 2011. – Т. 125. – № 6. – С. 41–44.
5. Системы электропитания космических аппаратов на основе регулируемых преобразователей с промежуточным звеном повышенной частоты / А.В. Осипов, Ю.А. Шиняков, А.И. Отто, М.М. Черная // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 323. – № 4. – С. 126–132.
6. Система электропитания космического аппарата: пат. Рос. Федерации № 2396666; заявл. 29.06.2009; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. – 8 с.
7. Способ электропитания космического аппарата: пат. Рос. Федерации № 2488933; заявл. 13.10.2011; опубл. 20.04.13, Бюл. № 21. – 7 с.
8. Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А., Аркатова О.Е. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2 (22). – Ч. 2. – С. 102–107.

Поступила 05.12.2013 г.

UDC 621.311

POWER SUPPLY SYSTEMS OF SPACECRAFT BASED ON ADJUSTABLE CURRENT INVERTERS

Aleksandr V. Osipov,

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: ossan@mail.ru

Yuriy A. Shinyakov,

Dr. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: shua@main.tusur.ru

Artur I. Otto,

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: ottoai@mail.ru

Mariya M. Chernaya,

Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: cmm91@inbox.ru

Aleksandr A. Tkachenko,

Cand. Sc., Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics,
Russia, 634050, Tomsk, Lenin avenue, 40. E-mail: ossan@mail.ru

The relevance of the research is caused by the need to develop energy efficient power supply system of the spacecraft.

Purpose of the research: *The synthesis of inverter and transformer structure of the power supply system of the spacecraft based on current inverters that allows implementing a mode of the maximum power point tracking of solar batteries when designing power supply systems with any output voltage.*

Research methods *are based on general theory of electrical circuits, theory of algebraic equations, computational methods and the use of modern instrumentation systems and methods of mathematical modeling.*

Results: *The authors have proposed the structure of the power supply system of the spacecraft summing output currents of inverters in a general node, which allows adjusting solar battery voltage in a range sufficient to implement a mode of the maximum power point tracking. The adjustment characteristics of the converter at drift of current-voltage characteristics of solar battery and different values of the load were obtained. It is shown that in current summing systems the position of the working point of the current-voltage characteristics for the solar battery does not depend on load power.*

Key words:

Power supply system of a spacecraft, current inverter, solar battery, rechargeable battery, extreme power control.

REFERENCES

1. Soustin B.P., Ivanchura V.I., Chernyshev A.I., Islyayev Sh.N. *Sistemy elektropitaniya kosmicheskikh apparatov* [Spacecraft power supply system]. Novosibirsk, Nauka, 1994. 318 p.
2. Mukund R. Patel. *Spacecraft power systems*. New York; Washington, D.C.: CRC Press, 691 p. Available at: http://www.e-reading.co.uk/bookreader.php/135136/Patel_-_Spacecraft_Power_Systems.pdf (accessed 13 January 2014).
3. Lesnykh A.N., Sarychev V.A. Issledovanie vysokovoltnykh sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov so stabilizatorami napryazheniya voltodobavochnogo tipa [The research of high-voltage power supply systems for spacecrafts with boost converter]. *Bulletin of Siberian state aerospace university named after academician M.F. Reshetnev*, 2006, no. 6. pp. 63–66.
4. Kazantsev Yu.M., Gordeev K.G., Lekarev A.F., Gavrilov A.M. Sistema electrosnabzheniya kosmicheskogo apparata s integrirovannym povyshayushchim preobrazovatelem napryazheniya [The power supply system of the spacecraft with integrated boost converter voltage]. *Questions of Electromechanics*, 2011, vol. 125, no. 6, pp. 41–44.
5. Osipov A.V., Shinyakov Yu.A., Otto A.I., Chernaya M.M. Sistemy electropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove reguliruemyykh preobrazovateley s promezhutochnym zvenom povyshennoy chastoty [The power system based on space vehicles controlled converters with intermediate high frequency link]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 323, no. 4, pp. 126–132.
6. Kudryashov V.S., Elman V.O., Nestirishin M.V., Gordeev K.G., Gladushchenko V.N., Khartov V.V., Kochura S.G., Soldatenko V.G., Melnikov N.V., Kozlov R.V. *Sistema electropitaniya kosmicheskogo apparata* [The power supply system of the spacecraft]. Patent RF, no. 23966666, 2010.
7. Karplyuk D.S., Korotkikh V.V., Nestirishin M.V., Openko S.I. *Sposob electropitaniya kosmicheskogo apparata* [The method of the spacecraft supply]. Patent RF, no. 2488933, 2013.
8. Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A., Arcatova O.E. Povyshenie energeticheskoy effektivnosti avtonomnykh fotoelectriceskikh energeticheskikh ustanovok [The increase of power efficiency of the autonomous photovoltaic energy installations]. *Reports of the Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics*, 2010, no. 2 (22), pp. 102–107.