УДК 621.311

ТОКОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Ю.М. Казанцев*,**, К.Г. Гордеев*, А.Ф. Лекарев*, С.П. Черданцев*, А.М. Гаврилов*

*ОАО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск
E-mail: polus@online.tomsk.net
**Томский политехнический университет

Рассмотрен способ регулирования напряжения солнечной батареи на токовом участке ее вольт-амперной характеристики. Показаны технические решения, позволяющие демпфировать колебания напряжения солнечной батареи, снизить пульсации и обеспечить высокое качество регулирования выходного напряжения системы электропитания в широком диапазоне изменения параметров.

Ключевые слова:
Солнечная батарея, согласованный фильтр, повышающий преобразователь напряжения, ключевой элемент, токовый регулятор.

Key words:
Solar battery, matched filter, boost converter, switch, current controller.

На большинстве космических аппаратов (КА) в качестве первичных источников питания используются солнечные батареи (СБ), которые по своей физической природе являются источниками тока с нелинейным и нестационарным внутренним сопротивлением. Их характеристики в значительной степени изменяются в процессе эксплуатации: при выходе из тени Земли охлажденные СБ генерируют максимальную энергию, которая с прогревом батареи уменьшается. Кроме того, со временем СБ деградируют от воздействия ионизирующего излучения космического пространства.

Вольт-амперная характеристика (ВАХ) СБ (рис. 1) описывается экспоненциальной функцией по трем характерным точкам: напряжения холостого хода $U_{\text{х.х}}$, тока короткого замыкания $I_{\text{к.з}}$ и оптимальных значений тока $I_{\text{опт}}$ и напряжения $U_{\text{опт}}$ [1]:

$$I_{\text{СБ}} = I_{\text{к.з}}\left[1-\exp\left(\frac{(U_{\text{СБ}}-U_{\text{х.х}})\ln\left(1-\frac{I_{\text{опт}}}{I_{\text{к.з}}}\right)}{U_{\text{опт}}-U_{\text{х.х}}}\right)\right], \quad (1)$$

где $I_{\text{СБ}}$ и $U_{\text{СБ}}$ – ток и напряжение солнечной батареи.

Точка оптимальных значений $I_{\text{опт}}$, $U_{\text{опт}}$ соответствует режиму отдачи максимальной мощности $P_{\max}$ (см. вольт-ваттную характеристику, рис. 1) и разделяет два принципиально разных участка эксплуатации СБ; на участке 1 с параметрами $U_{\text{х.х}} > U_{\text{СБ}} > U_{\text{опт}}$ и $0 > I_{\text{СБ}} > I_{\text{опт}}$ СБ обладает свойствами источника напряжения; на участке 2 с параметрами $U_{\text{опт}} > U_{\text{СБ}} > 0$ и $I_{\text{опт}} > I_{\text{СБ}} > I_{\text{к.з}}$ – источника тока.

Развитие систем электропитания (СЭП) КА началось с использования для регулирования напряжения на нагрузке шунтовых ограничителей напряжения СБ параллельного типа. Невозможность из-за прямого соединения шин СБ и нагрузки одновременного обеспечения оптимального режима работы СБ и заданного напряжения на нагрузке привела к тому, что начиная с 1981 г. стали применяться разработанные НПЦ «Полюс» последовательные регуляторы напряжения СБ, выполненные на базе импульсных преобразователей напряжения (ИП) понижающего типа. На их основе реализовано экстремальное регулирование мощности СБ [2].

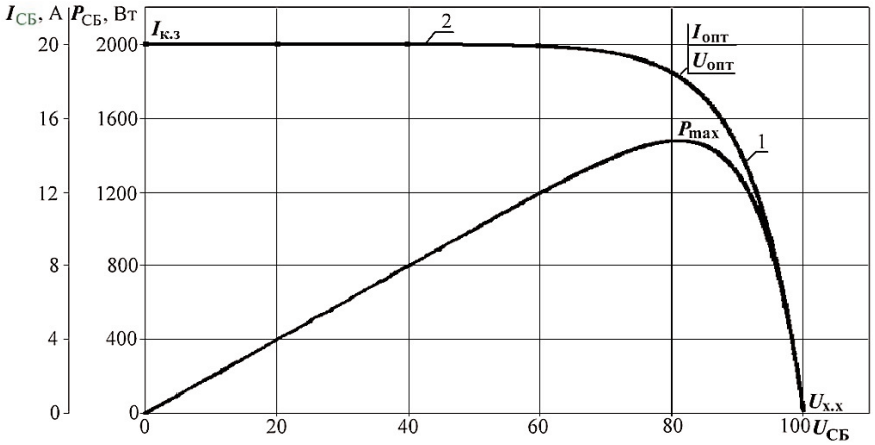

Рис. 1. *Вольт-амперная и вольт-ваттная характеристики СБ*

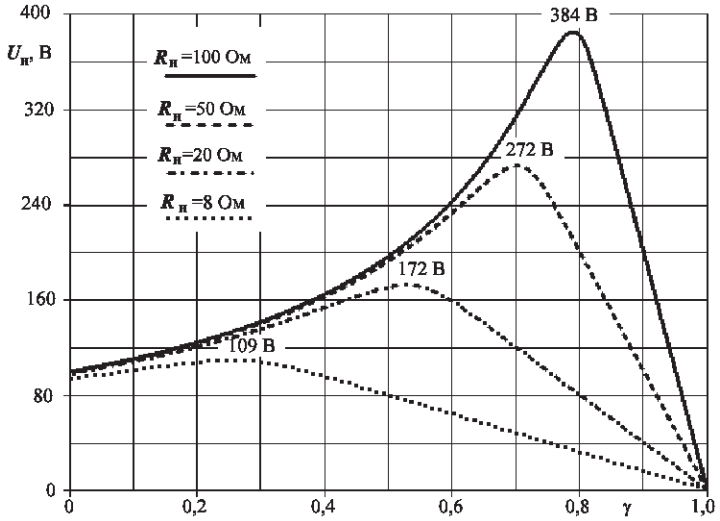

Рис. 2. *Семейство регулировочных характеристик системы СБ – повышающий ИП*

Поскольку в системе СБ – понижающий ИП напряжение $U_{СБ}$ должно быть выше напряжения нагрузки $U_н$, то при повышении $U_н$ до 100 В и более и длительном сроке активного существования КА с учетом последующей деградации $U_{СБ}$ в начале эксплуатации может достигать значений, при которых есть вероятность газовых разрядов между элементами СБ.

В связи с этим целесообразно рассмотреть возможность использования для регулирования напряжения на нагрузке ИП повышающего типа, для которого выполняется условие $U_{СБ}<U_н$.

Регулировочные характеристики системы СБ – повышающий ИП (рис. 2) для нагрузок сопротивлением $R_н$, равным 100, 50, 20 и 8 Ом, получены совместным решением в среде Mathcad уравнения (1) с параметрами ВАХ СБ: $U_{х.х}$=100 В, $I_{к.з}$=20 А, $U_{опт}$=82 В, $I_{опт}$=18 А и системы уравнений повышающего ИП с нагрузкой Rн

$$\begin{cases} U_н = \dfrac{U_{СБ}}{(1-\gamma)}; \\ I_н = I_{СБ}(1-\gamma); \\ R_н = \dfrac{U_н}{I_н}, \end{cases}$$

где γ – относительная длительность включенного состояния ключевого элемента ИП; $I_н$ – ток нагрузки; $R_н$ – сопротивление нагрузки.

Выходное напряжение $U_н$ нелинейно нарастает от значения $U_{СБ}$ при γ=0 до максимального значения $U_{н\,max}$ при экстремальном значении относительной длительности включенного состояния ключевого элемента ИП $\gamma=\gamma_э$, а затем линейно спадает от $U_{н\,max}$ при $\gamma=\gamma_э$ до нуля при γ=1.

Значение напряжения $U_{нmax}$ на выходе ИП при постоянном значении сопротивления нагрузки соответствует работе СБ в оптимальной точке ВАХ согласно соотношению

$$P_{max} = \frac{U^2_{н\,max}}{R_н},$$

из которого следует

$$U_{н\,max} = \sqrt{P_{max} R_н} = \sqrt{U_{опт} I_{опт} R_н};$$

$$\gamma_э = 1 - \sqrt{\frac{U_{опт}}{I_{опт} R_н}}.$$

Анализ ВАХ СБ (рис. 1) и регулировочных характеристик системы СБ – повышающий ИП (рис. 2) показывает преимущества эксплуатации СБ на токовом участке ВАХ: линейность регулировочных характеристик и широкий диапазон регулирования, обеспечивающий работоспособность системы при деградации параметров СБ до граничных значений, удовлетворяющих условию

$$P_{max} \geq U_н I_н.$$

Однако в практических схемах СБ – повышающий ИП (рис. 3) работа на токовом участке ВАХ СБ даже с малыми пульсациями входного тока ИП вызывает значительные пульсации напряжения СБ, что ограничивает фильтрующие свойства дросселя L1.

Установка параллельно СБ входного конденсатора Свх приводит к возникновению ограниченных параметрами ВАХ СБ низкочастотных колебаний напряжения и тока СБ (рис. 4). Кроме того, повышающие ИП характеризуются большими пульсациями тока выходных конденсаторов Свых.

Демпфировать колебания напряжения СБ с токовым преобразователем энергии предлагается установкой согласованного входного фильтра [3], а уменьшить пульсации тока выходных конденсаторов – применением в системе повышающего ИП магнитно-связанного сглаживающего фильтра на двухобмоточном дросселе [4] (рис. 5).

Базовым параметром токового преобразователя энергии СБ (рис. 3, 5) является индуктивность

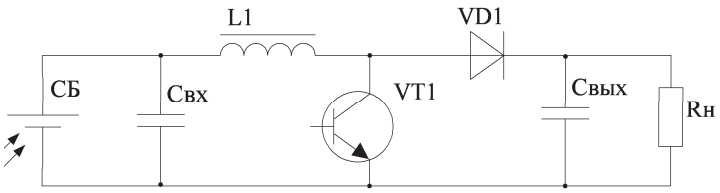

Рис. 3. *СБ – повышающий ИП*

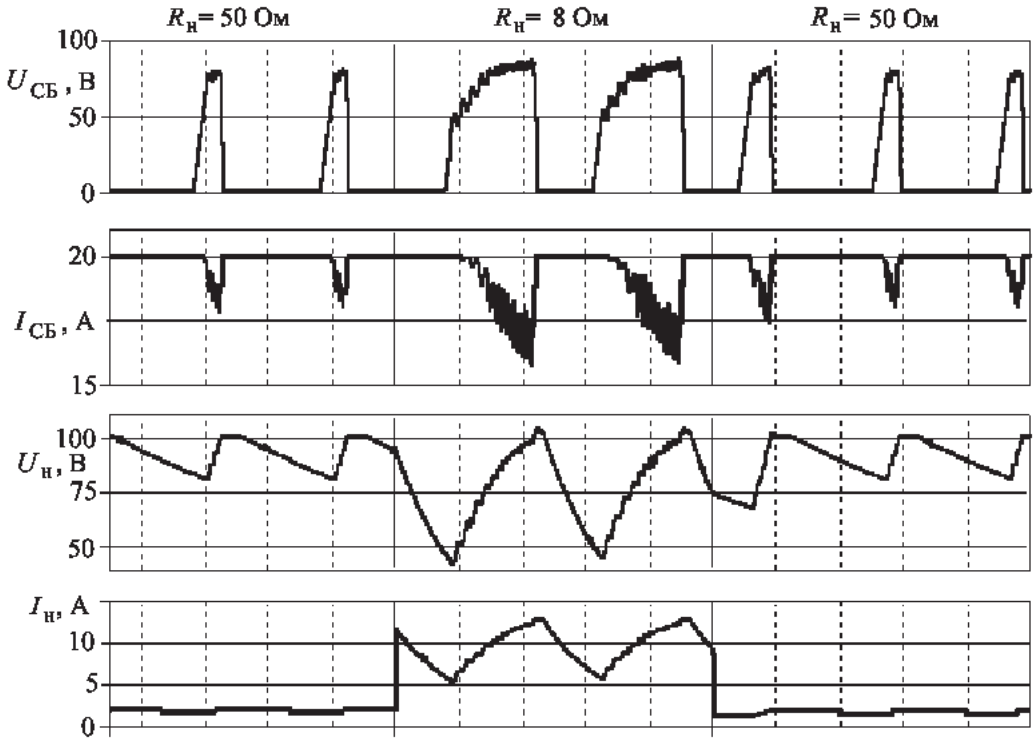

Рис. 4. *Диаграммы тока и напряжения СБ и нагрузки при преобразовании энергии СБ повышающим ИП на участке 2 ВАХ СБ, с входным конденсатором Свх емкостью 600 мкФ*

дросселя. Она влияет на уровень пульсаций выходного напряжения, а также на значение приращений входного тока при коммутации ключевого элемента VT1 и, следовательно, на минимальное значение потребляемого тока, при котором сохранится режим непрерывного тока в дросселе.

Минимальное значение индуктивности дросселя определяется по формуле

$$L_{\min} = \frac{U_н}{4\Delta I_L f_к},$$

где $f_к$ – частота коммутации ключевого элемента VT1; ΔI_L=2 $I_{вхmin}$ – допустимое значение пульсаций входного тока при $I_{вхmin}$ – минимальном значении входного тока.

Для токового преобразователя энергии (рис. 3, 5), состоящего из СБ с параметрами $U_{х.х}$=100 В, $I_{к.з}$=20 А, $U_{опт}$=82 В, $I_{опт}$=18 А, повышающего ИП с выходным напряжением $U_н$=100 В, частотой широтно-импульсной модуляции $f_к$=50 кГц и допустимым уровнем пульсаций входного тока ΔI_L=4 А обмотки L1 или L1.1 и L1.2 дросселя должны иметь индуктивность

$$L_{1.1} = L_{1.2} = \frac{100}{16 \cdot 50 \cdot 10^3} = 125 \text{ мкГн}.$$

Параметры входного согласованного фильтра определяют анализом входной цепи токового преобразователя энергии СБ (рис. 3).

Постоянную составляющую и гармонический состав периодических прямоугольных импульсов напряжения на ключевом элементе VT1 можно определить из ряда Фурье [5]:

$$U_{f_n} = \frac{T_0}{T} U_н + \sum_{n=1}^{\infty} 2U_н \frac{\sin\left(\frac{\pi n T_0}{T}\right)}{\pi n} \cos\left(\frac{2\pi n}{T} t\right), \quad (2)$$

где n – порядковый гармоники напряжения; T_0, T – длительности импульса и периода коммутации ключевого элемента VT1.

Поскольку обмотка дросселя L1 входит в состав фильтра, рассмотрим Т-образные двухполюсные низкочастотные фильтры Баттерворта, амплитудно-частотная характеристика которых задается формулой [6]

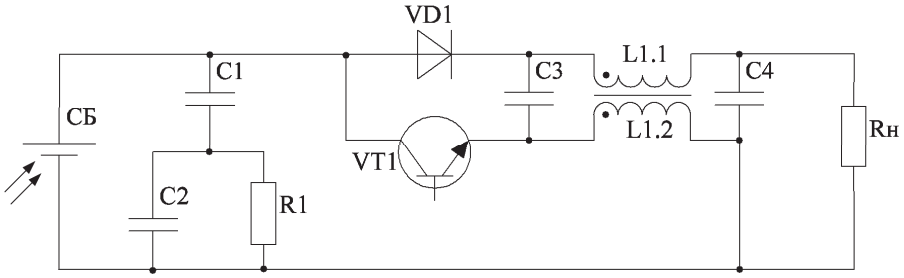

Рис. 5. *Токовый преобразователь энергии СБ*

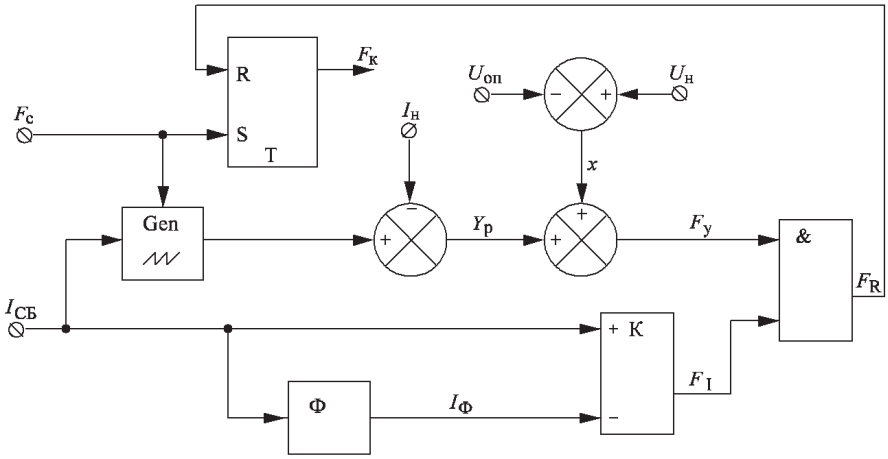

Рис. 6. *Регулятор токового преобразователя энергии СБ*

$$\frac{\Delta U_{СБ}}{U_{f_1}} = \frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{f}{f_с}\right)^{2h}}} \approx \left(\frac{f_с}{f}\right)^h, \qquad (3)$$

где $\Delta U_{СБ}$ – допустимое значение амплитуды пульсации напряжения СБ; $f_с$ – частота среза; h – порядок фильтра (число полюсов).

Из уравнения (2) определяем амплитуду первой гармоники прямоугольного импульсного напряжения, формируемого на входе ключевого элемента VT1. Она максимальна при T_0=0,5T:

$$U_{f_1} = \frac{2U_н}{\pi}, \text{ и для } U_н\text{=100 В имеем } U_{f_1}\text{=63,7 В.}$$

Для подавления этой гармоники до уровня 0,1 В из выражения (3) определяют необходимую частоту среза фильтра:

$$f_с = f_к\sqrt{\frac{0,1}{63,7}} = 50\cdot10^3\cdot0,0396 = 1,98 \text{ кГц.}$$

Нормализованные значения индуктивности и емкости для низкочастотного Т-фильтра Баттерворта второго порядка при нагрузке 1 Ом и частоте среза 1 рад/с [6] $L_{норм}$=1,4142 Гн; $C_{норм}$=0,7071 Ф.

С их помощью определяются действительные значения параметров входного фильтра (рис. 5) по формулам:

$$L_1 = R_1 L_{норм}/\omega;$$
$$C_1 = C_{норм}/\omega R_1, \qquad (4)$$

где ω – угловая частота среза.

Поскольку известны частота среза $f_с$ и индуктивность обмотки дросселя L1, то по нормализованным значениям параметров элементов фильтра и формуле (4) можно определить требуемые значения их параметров.

$$R_1 = \frac{L_1\omega}{L_{норм}} = \frac{125\cdot10^{-6}\cdot2\pi\cdot1,98\cdot10^3}{1,4142} = 1,1 \text{ Ом;}$$

$$C_1 = \frac{C_{норм}}{\omega R_1} = \frac{0,7071}{2\pi\cdot1,98\cdot10^3\cdot1,1} = 29,0 \text{ мкФ.}$$

Резистор R1 предназначен для демпфирования колебаний напряжения СБ, поэтому для отсечения постоянной составляющей напряжения СБ его и конденсатор С1 подключают через дополнительный конденсатор С2. Емкости конденсаторов С1 и С2 равны между собой.

Потери мощности на резисторе R1

$$P_{R1} = \frac{\Delta U_{СБ}^2}{R_1} = \frac{0,1^2}{1,1} = 0,0091 \text{ Вт.}$$

Управление токовым преобразователем энергии СБ (рис. 5) осуществляется регулятором (рис. 6), в котором на выходе генератора пилообразного напряжения (Gen) по синхроимпульсам $F_с$ формируется пилообразный сигнал с амплитудой, равной значению тока $I_{СБ}$, после сравнения с сигналом $I_н$, равным значению выходного тока ИП, он становится сигналом развертки $Y_р$, сигнал ошибки x формируется сравнением выходного

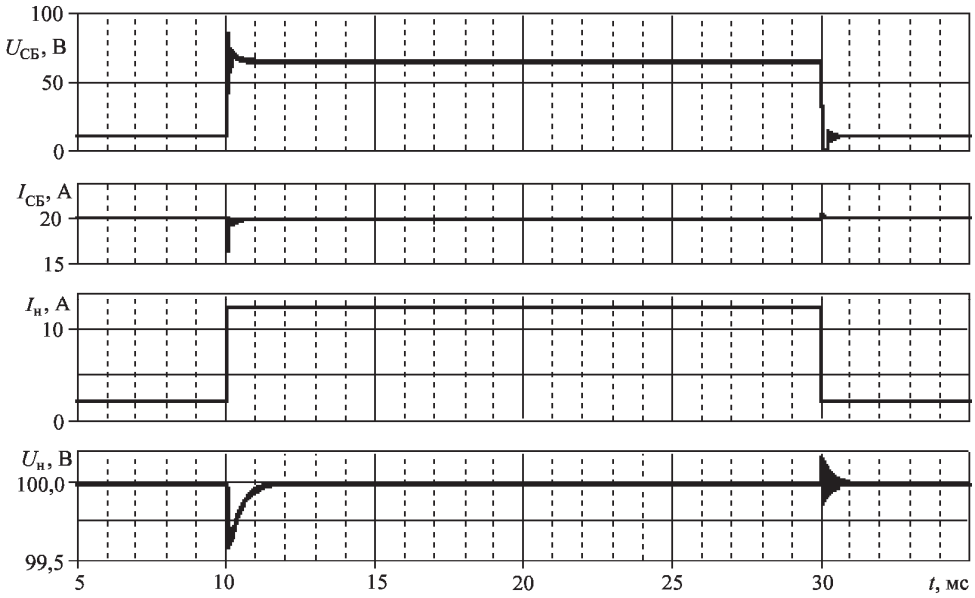

Рис. 7. *Диаграммы токов и напряжений на выходе СБ и ИП при изменении тока нагрузки от 2 до 12,5 А*

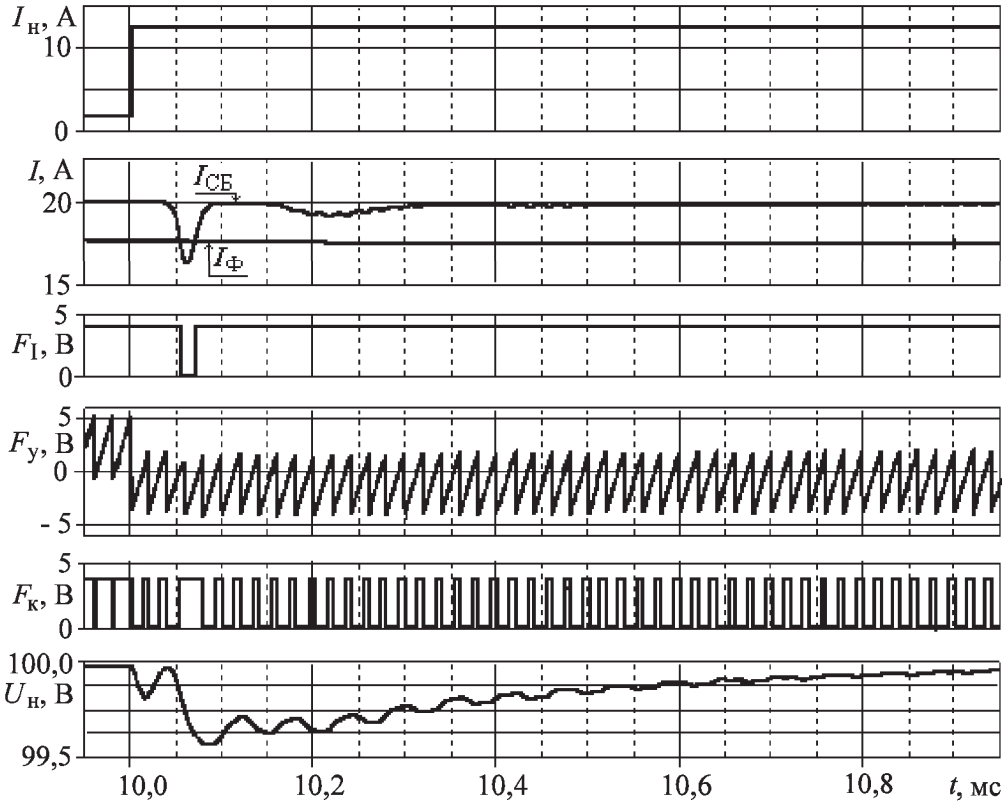

Рис. 8. *Диаграммы токов и напряжений переходного процесса при набросе тока нагрузки*

сигнала $U_н$ и сигнала задания $U_{оп}$. Управляющий сигнал $F_у$ формируется суммированием сигналов x и $Y_р$ [7].

При работе на токовом участке ВАХ (см. участок 2 на рис. 1) увеличение мощности, потребляемой нагрузкой, сопровождается уменьшением тока СБ. В переходном процессе при резком увеличении тока нагрузки возможен переход рабочей точки с токового участка ВАХ СБ на участок напряжения. Защита от такого перехода реализуется принудительным включением ключевого элемента VT1 при уменьшении тока СБ ниже оптимального $I_{опт}$.

Сигнал защиты F_I формируется компаратором К при уменьшении сигнала $I_{СБ}$ более чем на 10 % по отношению к формируемому фильтром Ф сигналу $I_ф$, равному среднему значению сигнала $I_{СБ}$

за пять периодов коммутации ключевого элемента.

Коммутация ключевого элемента осуществляется сигналом $F_к$, формируемым на прямом выходе RS-триггера Т, который устанавливается в состояние $F_к$=0 синхроимпульсом $F_с$ и в состояние $F_к$=1 сигналом $F_R=F_у F_I$.

При изменении тока нагрузки от 2 до 12,5 А (рис. 7) токовый ИП работает устойчиво, колебания напряжения на выходе СБ в установившихся режимах отсутствуют, длительность переходного процесса при изменении нагрузки не превышает 1,5 мс.

Работу основных узлов регулятора напряжения поясняют диаграммы токов и напряжений переходного процесса при набросе тока нагрузки с 2 до 12,5 А (рис. 8). При отработке этого воздействия управляющий сигнал $F_у$ уменьшает длительность сигнала $F_к$, управляющего включением ключевого элемента VT1, что приводит к уменьшению тока СБ. При $I_{СБ}$<18 А формируется сигнал F_I защиты от ухода с участка 2 ВАХ СБ, который включает ключевой элемент VT1. Ток СБ увеличивается, рабочая точка возвращается на токовый участок ВАХ.

В установившихся режимах амплитуда пульсаций напряжения $U_{СБ}$ не превышает 100 мВ, в выходной конденсатор С4 с выхода ИП поступают не импульсы с амплитудой 20 А, а переменная составляющая тока $I_{L1.1}$ амплитудой менее 1,1 А, пульсации выходного напряжения $U_н$ не превышают 6 мВ.

Выводы

1. Использование токового преобразователя энергии солнечной батареи, выполненного на базе повышающего преобразователя напряжения, обеспечивает работоспособность системы электропитания космического аппарата при широком диапазоне изменения параметров вольт-амперной характеристики солнечной батареи.
2. Фильтр с согласованной нагрузкой, установленный между солнечной батареей и повышающим преобразователем, обеспечивает демпфирование колебаний солнечной батареи при работе на токовом участке вольт-амперной характеристики. Потери на согласованном сопротивлении фильтра, при заданном уровне пульсаций 0,1 В не превышают 10 мВт.
3. Повышающий преобразователь напряжения с магнитно-связанным сглаживающим фильтром на базе двухобмоточного дросселя имеет малые пульсации выходного тока и, следовательно, малые пульсации выходного напряжения.
4. Предложенный закон управления токовым преобразователем энергии солнечной батареи с защитой от ухода рабочей точки с токового участка вольт-амперной характеристики солнечной батареи обеспечивает высокое качество регулирования выходного напряжения в широком диапазоне изменения параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 353 с.
2. Шиняков Ю.А., Гордеев К.Г., Черданцев С.П., Обрусник П.В. Варианты построения экстремальных шаговых регуляторов мощности солнечных батарей // Тр. ВНИИЭМ. – 1997. – Т. 97. Электромеханические устройства космических аппаратов. – С. 83–92.
3. Импульсный преобразователь энергии солнечной батареи: пат. 2309519 Рос. Федерация. № 2005136115/09; заявл. 21.11.05; опубл. 27.10.07, Бюл. № 30. – 3 с.
4. Поликарпов А.Г., Сергиенко Е.Ф., Чу С.К. Магнитно-связанный сглаживающий фильтр для импульсных регуляторов и преобразователей постоянного напряжения // Электронная техника в автоматике / под ред. Ю.И. Конева. – М.: Радио и связь, 1986. – Вып. 17. – С. 116–121.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Наука, 1973. – 832 с.
6. Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. В 2-х томах. Пер с англ. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. – 598 с.
7. Способ питания нагрузки от солнечной батареи: пат. 2279705 Рос. Федерация. № 2004128060/09; заявл. 20.09.04; опубл. 10.07.06, Бюл. № 19. – 5 с.

Поступила 11.02.2011 г.