

СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ПОВЫШАЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Ю.М. Казанцев, К.Г. Гордеев,
А.Ф. Лекарев, А.М. Гаврилов
(ОАО «НПЦ «Полус»)

Исследуется система электроснабжения космического аппарата, работающая на токовом участке вольт-амперной характеристики солнечной батареи. Предложена структура, в которой функции стабилизатора напряжения солнечной батареи, заряда и разряда аккумуляторной батареи интегрируются магнитно-связанным фильтром.

Ключевые слова: система электроснабжения, солнечная батарея, аккумуляторная батарея, повышающий преобразователь, магнитно-связанный фильтр, ключевой элемент.

В системах электроснабжения (СЭС) космических аппаратов (КА) с выходным напряжением 100 В и выше имеется возможность использовать токовый участок вольт-амперной характеристики солнечной батареи (СБ) со стабилизатором напряжения (СН), выполненным по схеме повышающего преобразователя, при этом зарядно-разрядное устройство (ЗРУ) аккумуляторной батареи (АБ) подключают к выходным шинам системы (рис. 1) [1].

Для такой СЭС не требуются высоковольтные СБ, так как выполняется условие $U_{СБ} < U_{н}$, но её недостатком является двойное преобразование энергии при заряде АБ. Кроме того, работа на токовом участке СБ вызывает значительные пульсации её напряжения и уменьшает фильтрующие свойства дросселя повышающего преобразователя. Установка конденсаторов на входе преобразователя приводит к возникновению ограниченных параметрами СБ низкочастотных колебаний входного напряжения и тока.

Известно также, что типовые схемы повышающих преобразователей характеризуются большими пульсациями тока выходных конденсаторов.

Демпфировать колебания напряжения СБ при работе на токовом участке позволяет установка согласованного входного фильтра, а уменьшить пульсации тока выходных конденсаторов – применение в повышающем преобразователе напряжения магнитно-связанного фильтра на основе двухобмоточного дросселя с одинаковым числом витков [2].

При этом в СН СБ с таким преобразователем можно интегрировать функции ЗРУ АБ, что позволяет реализовать СЭС на одном интегрированном преобразователе напряжения (рис. 2).

При наличии энергии в СБ и заряженном состоянии АБ преобразователь работает в режиме СН – стабилизации выходного напряжения $U_{н}$ от СБ.

При наличии энергии в СБ и разряженном состоянии АБ преобразователь работает в режиме СН + ЗУ – стабилизации выходного напряжения $U_{н}$ с функцией заряда АБ от СБ.

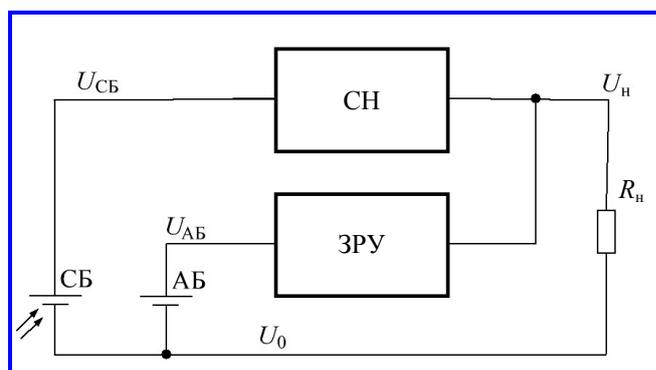


Рис. 1. Система электроснабжения, работающая на токовом участке вольт-амперной характеристики солнечной батареи

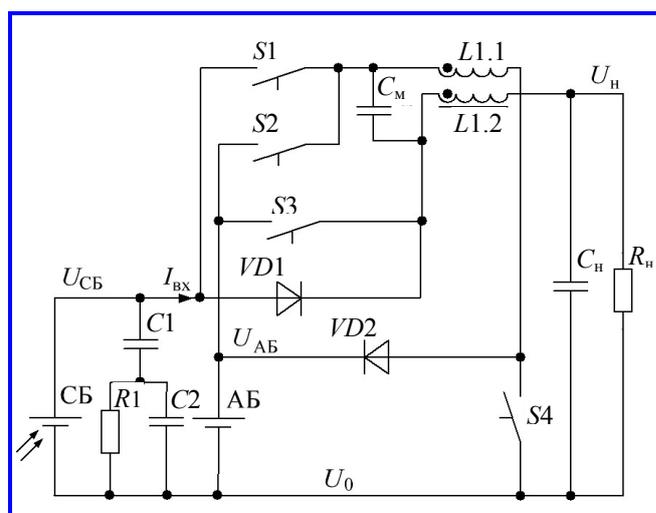


Рис. 2. Система электроснабжения с интегрированным преобразователем напряжения

При отсутствии энергии в СБ (тень Земли) преобразователь работает в режиме РУ – стабилизации выходного напряжения U_n от АБ.

При параллельной работе нескольких интегрированных преобразователей напряжения можно реализовать режим СН + РУ – стабилизации выходного напряжения U_n от СБ и АБ.

Режим СН (см. рис. 2) осуществляется коммутацией ключевого элемента S1 при разомкнутых S2, S3 и замкнутом S4.

В этом режиме приращение входного тока преобразователя при замкнутом состоянии ключевого элемента S1:

$$\Delta I_{\text{вх}} = \frac{1}{L} U_{\text{СБ}} \gamma T,$$

где T – длительность периода коммутации.

При этом по обмоткам дросселя протекают токи, средние значения которых за период коммутации определяются выражениями:

$$\begin{aligned} I_{L1.1} &= I_{\text{СБ}} \gamma; \\ I_{L1.2} &= I_{\text{СБ}} (1 - \gamma) = I_n, \end{aligned}$$

где γ – относительная длительность замкнутого состояния ключевого элемента S1; $I_{\text{СБ}} = I_{\text{вх}}$ – ток СБ; $I_{\text{вх}}$ – среднее за период коммутации значение входного тока преобразователя.

Регулировочная характеристика преобразователя напряжения описывается выражением [2]

$$U_n = I_{\text{СБ}} R_n (1 - \gamma). \quad (1)$$

Режим СН + ЗУ (см. рис. 2) осуществляется коммутацией ключевого элемента S1 при разомкнутых S2, S3 и S4.

В этом режиме приращение входного тока преобразователя при замкнутом состоянии ключевого элемента S1:

$$\Delta I_{\text{вх}} = \frac{1}{L} (U_{\text{СБ}} - U_{\text{АБ}}) \gamma T.$$

Заряд АБ осуществляется током обмотки дросселя L1.1, среднее значение которого определяется по выражению

$$I_{\text{АБ}} = I_{L1.1} = I_{\text{СБ}} \gamma.$$

Регулировочная характеристика преобразователя напряжения в этом режиме идентична описанной выражением (1).

Режим РУ (см. рис. 2) осуществляется поочередной коммутацией ключевых элементов S2 и S3 при отключённом S1 и включённом S4.

В этом режиме приращение входного тока преобразователя при замкнутом состоянии ключевого элемента S1:

$$\Delta I_{\text{вх}} = \frac{1}{L} U_{\text{АБ}} \gamma T.$$

Регулировочная характеристика преобразователя напряжения описывается выражением

$$U_n = \frac{U_{\text{АБ}}}{1 - \gamma}.$$

Индуктивность обмоток дросселя L является базовым параметром, она влияет на уровень пульсаций выходного напряжения, а также на значение приращений входного тока при коммутации ключевых элементов S1 или S2, S3 и, следовательно, на минимальное значение потребляемого тока, при котором сохранится режим непрерывного тока в дросселе. Кроме того, она входит в состав расчётных параметров входного согласованного фильтра.

Минимальное значение этой индуктивности определяется по выражению

$$L_{\text{min}} = \frac{U_n}{4 \Delta I_L f_k},$$

где f_k – частота коммутации ключевого элемента (S1 или S2); ΔI_L – допустимое значение пульсаций входного тока.

Для СЭС с СБ, имеющей напряжение холостого хода $U_{\text{хх}} = 120$ В, ток короткого замыкания $I_{\text{кз}} = 20$ А, и СН, состоящим из повышающего преобразователя с выходным напряжением $U_n = 100$ В, частотой широтно-импульсной модуляции $f_k = 50$ кГц и допустимым уровнем пульсаций входного тока $\Delta I_L = 4$ А, индуктивность обмоток дросселя L должна быть не менее 125 мкГн.

Параметры входного согласованного фильтра определим анализом силовой цепи схемы (см. рис. 2) в режиме СН.

Максимальное значение амплитуды первой гармоники периодических прямоугольных импульсов напряжения на ключевом элементе S1 определяется по выражению

$$U_{f1} = \frac{2U_n}{\pi}.$$

Для $U_n = 100$ В имеем $U_{f1} = 63,7$ В.

Поскольку индуктивность обмоток дросселя L входит в состав расчётных параметров входного согласованного фильтра, рассмотрим Т-образные двухполюсные низкочастотные фильтры Баттерворта, амплитудно-частотная характеристика которых задается формулой [3]:

$$\frac{U_{R1}}{U_{f1}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2h}}} \approx \left(\frac{f_c}{f}\right)^h,$$

где U_{R1} – допустимое значение амплитуды пульсации напряжения на резисторе $R1$; f_c – частота среза; h – порядок фильтра (число полюсов).

Для подавления пульсаций напряжения на СБ до уровня 0,1 В допустимая пульсация напряжения на резисторе $R1$ должна быть 0,05 В, следовательно, частота среза фильтра

$$f_c = f_k \sqrt{\frac{0,05}{63,7}} = 1,4 \text{ кГц.}$$

Нормализованные значения индуктивности и ёмкости низкочастотного Т-образного фильтра Баттерворта второго порядка при нагрузке 1 Ом и частоте среза 1 рад/с [3]:

$$L_{\text{норм}} = 1,4142 \text{ Гн;}$$

$$C_{\text{норм}} = 0,7071 \text{ Ф.}$$

С их помощью определяются действительные значения параметров входного фильтра (см. рис. 2) по формулам

$$L = R_1 L_{\text{норм}} / \omega;$$

$$C = C_{\text{норм}} / \omega R_1,$$

где ω – угловая частота среза.

Поскольку известны частота среза f_c и индуктивность обмоток дросселя, то по нормализованным значениям параметров элементов фильтра определяются требуемые значения этих параметров:

$$R_1 = \frac{L\omega}{L_{\text{норм}}} = 0,78 \text{ Ом;}$$

$$C = \frac{C_{\text{норм}}}{\omega R_1} = 103 \text{ мкФ.}$$

Работа СЭС с расчётными значениями параметров согласованного фильтра, ёмкости конденсаторов магнитно-связанного фильтра $C_M = C_H = 700$ мкФ исследовалась на имитационной модели, в которой вольт-амперная характеристика СБ описывалась выражением $I_{CB} = I_{K.3}(1 - e^{0,13(U_{CB} - U_{K.3})})$, АБ – источником напряжения $U_{AB} = 60$ В, а нагрузка – резистором сопротивления $R_H = 8$ Ом.

Результаты исследования иллюстрируются диаграммами токов и напряжений в контрольных точках СЭС:

- в режиме СН (рис. 3);
- в режиме СН + ЗУ (рис. 4);
- в режиме РУ (рис. 5).

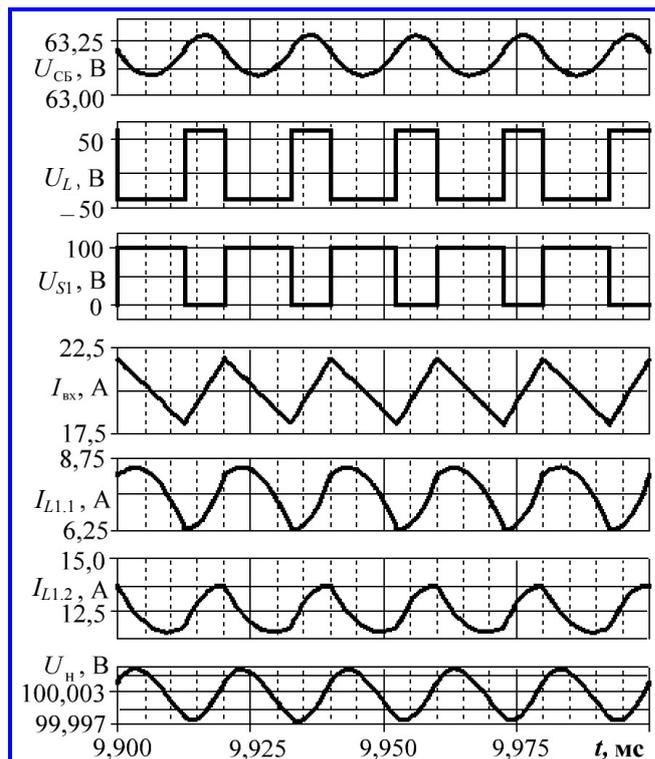


Рис. 3. Токи и напряжения в контрольных точках в режиме СН

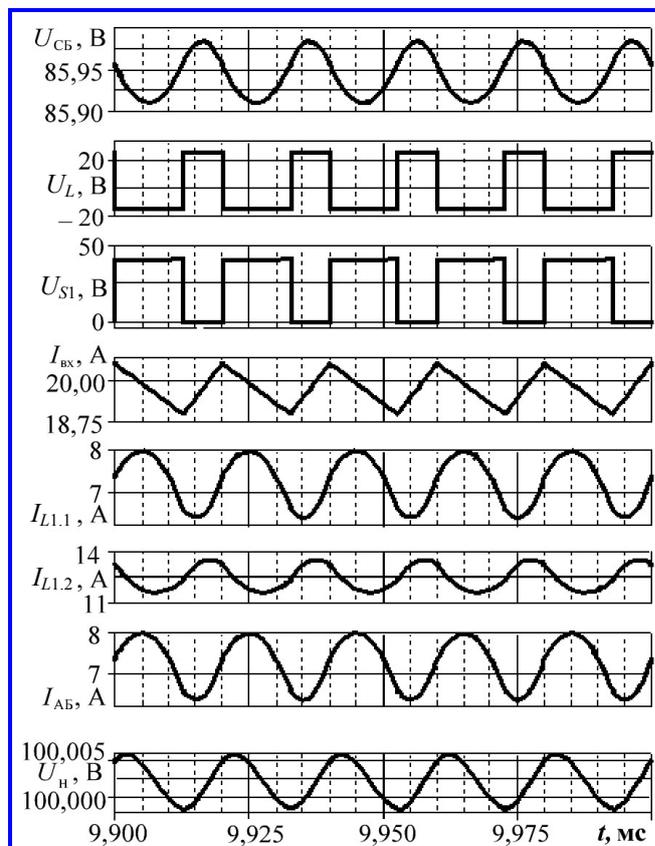


Рис. 4. Токи и напряжения в контрольных точках в режиме СН + ЗУ

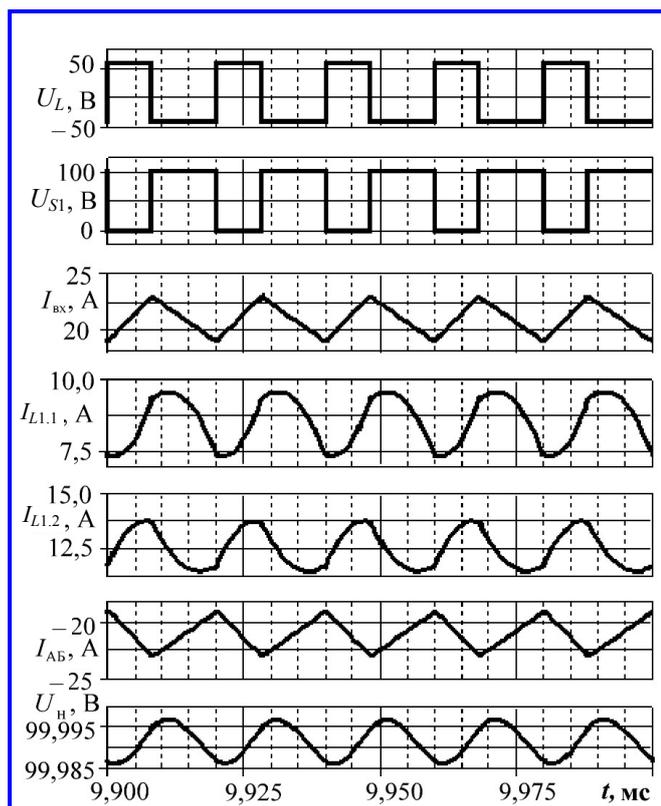


Рис. 5. Токи и напряжения в контрольных точках в режиме РУ

Значение токов и напряжений в контрольных точках системы в различных режимах

Обозначение параметра	Режим СН	Режим СН + ЗУ	Режим РУ
$U_{СБ}, B$	63,2	85,95	–
$\Delta U_{СБ}, B$	0,9	0,7	–
$I_{СБ}, A$	19,99	19,76	0
U_{SI}, B	100	40	100
$I_{L1.1}, A$	7,47	7,26	8,5
$\Delta I_{L1.1}, A$	1,25	0,7	1,25
$I_{L1.2}, A$	12,49	12,49	12,49
$\Delta I_{L1.2}, A$	1,25	0,7	1,25
U_n, B	100,002	100,001	99,99
$\Delta U_n, мВ$	5	3	5
$I_{АБ}, A$	0	7,5	21
$\Delta I_{АБ}, A$	0	0,7	2

Δ – амплитуда переменной составляющей (пульсации) соответствующего параметра.

Поступила в редакцию 21.10.2011

Юрий Михайлович Казанцев, д-р техн. наук, зам. главного конструктора, т. (3822) 55-59-63.
Константин Георгиевич Гордеев, канд. техн. наук, зам. главного конструктора, т. (3822) 55-73-78.
Анатолий Фёдорович Лекарев, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, т. (3822) 55-59-63.
Анатолий Михайлович Гаврилов, инженер-конструктор, т. (3822) 56-05-55.
 E-mail: polus@online.tomsk.net.

В таблицу сведены значения токов и напряжений в контрольных точках системы в различных режимах работы.

Видно, что СЭС устойчиво работает во всех режимах, при этом амплитуда пульсаций напряжения СБ не превышает 0,1 В и выходного напряжения 5 мВ, а рассеиваемая на резисторе R1 мощность не превышает 60 мВт.

Выводы

1. Использование повышающего преобразователя напряжения в СЭС КА с выходным напряжением 100 В и выше не требует высоковольтных СБ.
2. Фильтр с согласованной нагрузкой, установленный между СБ и повышающим преобразователем напряжения, обеспечивает демпфирование колебаний напряжения и тока СБ при работе на токовом участке её вольт-амперной характеристики.
3. Применение магнитно-связанного сглаживающего фильтра на базе двухобмоточного дросселя позволило значительно снизить пульсации выходного напряжения повышающего преобразователя.
4. Использование в фильтре двухобмоточного дросселя даёт возможность реализовать СЭС на одном интегрированном преобразователе напряжения, совмещающем функции СН, ЗРУ.
5. Работа системы в режиме стабилизации выходного напряжения U_n с функцией заряда АБ от СБ происходит без двойного преобразования энергии.

Литература

1. Соустин Б. П. Системы электропитания космических аппаратов / Б. П. Соустин, В. И. Иванчура, А. И. Чернышев [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1994. – 318 с.
2. Токвый стабилизатор напряжения солнечной батареи для систем электропитания космических аппаратов / Ю. М. Казанцев, К. Г. Гордеев, А. Ф. Лекарев [и др.] // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. научн. тр. – Томск : НТЛ, 2011. – С. 62 – 70.
3. Хоровиц П. Искусство схемотехники. В 2 т. Т. 1. / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. – М. : Мир, 1983. – 598 с.