E. S. Zhukova, I. N. Kartsan

# MAINTENANCE OF THE INFORMATION CONFIDENTIALITY IN THE CENTRE OF FLIGHT CONTROL

The series of measures to maintain the information confidentiality processed by information system in the Centre of flight control are considered.

Keywords: information safety maintenance, cryptographic protection of the information.

© Жукова Е. С., Карцан И. Н., 2009

УДК 629.78.064

П. И. Мельников, Р. В. Козлов, В. С. Кудряшов

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СТУДЕНЧЕСКИЙ»

Изложены результаты проектирования системы электропитания малого космического annapama «Студенческий».

Ключевые слова: система электропитания, экстремальное регулирование мощности, мостовой инвертор, литий-ионная аккумуляторная батарея, концентраторы.

Малый космический аппарат «Студенческий» (далее – СМКА) – космический аппарат микрокласса. Основное предназначение СМКА – решение прикладных задач и проведение экспериментальной отработки новых технологий, в том числе в части систем электропитания (СЭП).

Цель представленной работы – проектирование СЭП для СМКА (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид космического аппарата «Студенческий»

СЭП состоит из следующих элементов:

- солнечной батареи;

- аккумуляторной батареи;

 – блока автоматики и стабилизации напряжения.
 При работе над СЭП принималась следующая философия проектирования: 1. На первых СМКА ввиду крайне сжатых сроков создания космического аппарата (КА) применялось решение, которое использовалось на малом космическом аппарате (МКА) «Юбилейный» – устанавливался комплект аппаратуры ДОКА-Б, поставляемый НИЛАКТ (г. Калуга). В состав этой аппаратуры входят металлогидридная аккумуляторная батарея (АБ) из 10 аккумуляторов емкостью 9,5 Ач и автоматика СЭП. Поэтому на первых МКА «Студенческий» разрабатывалась только солнечная батарея (БС).

2. На втором этапе проектировалась и разрабатывалась базовая СЭП СМКА на основе инновационных решений по АБ и электронной части СЭП. В составе базовой СЭП использовалась БС, разработанная для первого этапа.

3. Разрабатывалась программа летных экспериментов по СЭП КА, преследующая две цели:

отработку новых технологий в интересах ОАО «ИСС»;

– отработку новых решений для базовой СЭПСМКА.
 Использовались следующие исходные данные для проектирования:

высота орбиты СМКА 1 200 км;

 период обращения 115 мин, максимальная длительность теневого участка орбиты 35 мин;

срок активного существования (САС) 1 год;

 – рассматривались два способа пассивной магнитогравитационной ориентации КА:

одноосная на Землю;

трехосная (одна ось на Землю, вторая – по нормали к орбите, третья – по направлению движения КА);

– напряжение питания аппаратуры  $12^{+3}_{-2}$  B;

- форма КА (БС) - параллелепипед;

- дежурная нагрузка при одноосной ориентации
- 10,1 Вт, при трехосной ориентации 12,1 Вт;

- сеанс длился 10 мин, мощность при одноосной ориентации – 15 Вт. при трехосной – 17 Вт.

Проектирование СЭП для первых СМКА. Проектирование СЭП сводилось к разработке БС с адаптацией ее к АБ и автоматике СЭП, входящих в аппаратуру ДОКА-Б. Структурная схема СЭП первого этапа приведена на рис. 2.

Солнечная батарея должна удовлетворять следующим требованиям:

а) средневитковая мощность БС:

– для трехосной ориентации  $P_{\rm {}_{\rm { {\rm 5Ccp}}}}$  – 12,1 Вт; – для одноосной ориентации  $P_{\rm {}_{\rm { {\rm 5Ccp}}}}$  – 10,1 Вт;

б) расчет БС должен производиться с учетом обеспечения зарядного напряжения для АБ, которое составляет 14 В. Проектирование БС произволось на основе трехкаскадных GaAs фотопреобразователей (ФП) (табл. 1).

При проектировании рассматривались несколько вариантов БС, отличающихся по следующим параметрам: - способу ориентации;

- количеству ФП в цепи элементарного генератора **(**ЭΓ**)**;

– форме БС КА «Студенческий».

Расчетные случаи расположения каждого варианта относительно орбиты приведены на рис. 3.

Первый вариант представляет собой худший случай расположения КА на орбите при одноосной ориентации на Землю. При таком расположении выходная мощность БС минимальная. Во втором варианте применена трехосная ориентация КА. Третий вариант - оптимизация второго варианта за счет раскрывающихся панелей. Четвертый вариант по габаритам аналогичен первому, но для трехосной ориентации, причем КА располагается так, что его расположение увеличивает суммарную освещенность БС (рис. 4).

Расчет всех рассматриваемых вариантов проводился в следующей последовательности:

- при помощи пакета «Маткад» моделировалась ВАХ БС с учетом влияния температуры;

- далее в «Маткад» моделировались графики освещенности для каждого варианта.

Результат расчета для теневой орбиты при худшем случае одноосной ориентации приведен на рис. 4.

Далее была рассчитана мощность БС для каждого варианта (табл. 2).

Вариант 1 удовлетворяет условию обеспечения положительного энергобаланса, а также является надежным с точки зрения обеспечения живучести КА (выполняется условие положительного энергобаланса при любой ориентации КА). В варианте 2 сделана попытка уменьшить габариты КА за счет оптимизации электрической цепи. Однако, как показал расчет, при таком варианте не обеспечивается положительный энергобаланс на теневой орбите. В варианте 3 за счет расположения панелей 1-1 и 1-2 под углом  $a = 30^{\circ}$  к осевой линии КА, стало возможным получить выигрыш по мощности, что позволило обеспечить положительный энергобаланс при тех же габаритах, что и во втором варианте. Однако третий вариант имеет существенный недостаток: при сбое в системе ориентации и стабилизации (СОС) может возникнуть ситуация, при которой из-за разворота КА вокруг продольной оси и попадания грани с 8 ФП в ЭГ в положение



Рис. 2. Структурная схема СЭП первого этапа с общей шиной «БС-АБ-нагрузка»

Таблица 1

Характеристики GaAs+++  $\Phi\Pi$  в условиях AM0<sup>\*</sup>, T = 28 <sup>0</sup>C

Параметр	Обозначение	Значение
Размеры ФП	A  imes B, см	40  imes 80
КПД ФП	$\eta_{\Phi\Pi}, \%$	28,6
Напряжение холостого хода	$U_{\rm xx}, { m B}$	2,575
Оптимальное напряжение	$U_{\text{опт}}, \mathbf{B}$	2,230
Ток короткого замыкания	<i>I</i> <sub>кз</sub> , А	0,471
Оптимальный ток	<i>I</i> <sub>опт</sub> , А	0,460

\* AM0 – атмосферная масса, равная нулю.

100%-й освещенности не будет обеспечиваться требуемое для заряда АБ напряжение на БС ввиду высокой температуры ФП.

Поэтому с целью обеспечения гарантированного запаса мощности, даже в случае сбоев в ориентации и перехода к одноосному режиму, предпочтительным является вариант 4, представляющий собой разновидность первого варианта при реализации трехосной ориентации КА ребром в плоскости орбиты (табл. 3).

**Проектирование базовой СЭП СМКА.** При проектировании базовой СЭП СМКА была разработана струк-

турная схема СЭП, оптимизирована работа солнечной и аккумуляторной батарей.

Структурная схема СЭП. Структура СЭП с общей шиной с аппаратурой ДОКА-Б обладает рядом недостатков: большой массой АБ, низкой эффективностью использования БС и низкой стабильностью напряжения.

На втором этапе проектирования ставилась задача разработать базовую СЭП, которая будет лишена этих недостатков.

К базовой СЭП предъявляются следующие требования:



Рис. 3. Расчетные случаи расположения КА на орбите



Рис. 4. Изменение освещенности и температуры в зависимости от положения КА на витке: *I* – изменение освещенности первой панели; *2* – изменение освещенности второй панели; *3* – изменение температуры первой панели; *4* – изменение температуры второй панели

Таблица 2

	Вариант БС	Средневитковая мощность БС на теневой орбите, Вт	Мощность БС на солнечной орбите, Вт	Количест во ФП, шт.	Площадь БС, м <sup>2</sup>	Масса БС (без каркасов), кг	Выполнение энергобаланса	Тип ориентации
1	Вариант 1	11,3	12,1	108	0,37	0,8	Да	одноосная
2	Вариант 2	10,1	15,2	96	0,33	0,72	Нет	трехосная, по движению грань КА
3	Вариант 3	12,3	15,2	96	0,33	0,72	Да	»
4	Вариант 4	16,1	31,4	108	0,37	0,8	Дa	трехосная, по движению ребро КА

Основные характеристики БС для вариантов 1-4

- повышение отдаваемой мощности БС;

- снижение массы АБ;

- стабильность напряжения не хуже 5 %;

- обеспечение унификации СЭП.

Вначале производился выбор структуры базовой СЭП.

Отработанная, установленная на ряд КА производства ОАО «ИСС» схема СЭП с экстремальным регулятором мощности (ЭРМ) представлена на рис. 5. Новая, неотработанная схема с мостовым преобразователем, являющаяся модификацией схемы с ЭРМ, приведена на рис. 6 [1;2].

Характеристики данных структурных схем приведены в табл. 4.

Для СМКА принята схема с мостовыми преобразователями, которая обладает следующими преимуществами перед СЭП первого этапа:

- потенциально более высоким КПД использования БС;

Рис. 5. СЭП с ЭРМ

высокой стабильностью напряжения;

 – обеспечением унификации СЭП относительно требований на напряжение нагрузки.

Солнечная батарея. БС для базовой СЭП заимствовали из СЭП для первых КА, однако, благодаря работе БС в оптимальной рабочей точке, по сравнению с СЭП первых КА, в базовой СЭП есть выигрыш по мощности БС около 15 %.

Аккумуляторная батарея. Был проведен анализ аккумуляторных батарей, из которого стало ясно, что для АБ базовой СЭП максимально подходят Li-ion аккумуляторы (табл. 5).

Максимально требованиям СМКА удовлетворяет Liion аккумулятор космического применения фирмы SAFT марки MPS 126 065 [3] с характеристиками, представленными в табл. 5. Учитывая требования по энергоемкости, для СМКА необходима АБ, состоящая из трех таких акку-

Таблица 3

## Итоговые характеристики СЭП первых КА

Масса СЭП, кг Средневитковая мощнос					ющность БС,	щность БС, Вт Напряжение		яжение
5,3, в том числе:			Теневая орбита Солнечная орбита		Номинал, В	Стабильность,		
		_		%				
БС	АБ	БАС*	одноосная	трехосная	одноосная	трехосная	12	41
0,8	3,5	1,0	11,3	16,1	12,1	31,4	12	41

\* БАС – блок автоматики и стабилизации.





Рис. 6. СЭП с мостовым преобразователем

Таблица 4

#### Анализ характеристик структурных схем

Тип схемы	КПД БС, %	Стабильное напряжение <i>U</i> , %	Количество номиналов напряжения
СЭП с ДОКА-Б	80	41	1
СЭП с ЭРМ	94	1–3	1
СЭП с мостовым инвертором и ЭРМ	97	1–3	Любое, в зависимости от требований нагрузки

Таблица 5

## Основные характеристики аккумуляторов и АБ космического применения

Тип АБ (КА)	Номиналы емкости	Удельная энергия аккумуляторов, Вт · ч/кг	Удельная энергия АБ Вт · ч/кг	Удельная стоимость, руб/Вт · ч
NiCd (SNAP-1)	Любые <sup>*</sup>	25-50	20–40	1 300
NiH2 (Гонец-М)**	> 25 Ач	60–80	48–64	2 700
Li-ion (Cryosat)	Любые <sup>*</sup>	100-110	80 - 88	3 500

\* Есть возможность подобрать для любого типа СЭП КА, включая СЭП СМКА.

\*\* Исходя из ныне существующих типоразмеров, масса всех АБ данного типа свыше 10 кг.

муляторов. Характеристики такой батареи приведены также в табл. 5 (столбец 2). АБ удовлетворяет всем требованиям, однако вследствие большой стоимости, применение ее на СМКА проблематично. Отсутствие более дешевых АБ космического применения, подходящих для использования на МКА, подстегнуло к поиску нестандартного решения. Была рассмотрена возможность использования для базовой СЭП СМКА АБ широкого применения. Характеристики АБ на основе аккумуляторов широкого потребления Duralite 7343 и Duralite 7212 приведены в табл. 6 (столбец 3, 4) [4].

Стоимость таких АБ не превышает 10 000 руб., а начальные удельные характеристики сравнимы с космическими АБ. Это обстоятельство является главным аргументом в пользу установки на таком низкобюджетном проекте, как СМКА, АБ из аккумуляторов широкого применения.

Однако возможность применения промышленных Li-ion аккумуляторов в условиях негерметичного КА требует проведения работ по подтверждению:

 – стойкости в условиях механических воздействий при выводе на орбиту;

 – стабильности характеристик при циклировании в режимах работы на КА;

 – стойкости в условиях воздействия факторов космического пространства (радиация, невесомость, вакуум).

Требуется разработка специальной программы наземной экспериментальной отработки батарей с окончательным подтверждением работоспособности в летном эксперименте.

Спроектированная базовая СЭП обладает рядом преимуществ относительно стартовой (табл. 7).

**Программа летных экспериментов.** На СМКА предлагается реализовать 2 вида экспериментов:

– эксперименты в интересах отработки новых технологий для создания задела для будущих КА ОАО «ИСС»;

– эксперименты в интересах разработки базовой СЭП МКА «Студенческий».

В интересах отработки новых технологий предлагается проведение экспериментов по следующим перспективным элементам СЭП:

 модулям ФП с концентраторами на основе линз Френеля;

– модулям ФП с плоскими концентраторами;

 новым типам ФП (в том числе на основе аморфного кремния);

- новым типам АБ (отработка Li-polymer АБ);

– техническим решениям в части блока автоматики и стабилизации СЭП, например, балансировка АБ на заряде (индивидуальный заряд каждого аккумулятора).

В интересах разработки бортовой СЭП предлагается отработка решений мостовых схем регулирования напряжения и АБ из аккумуляторов широкого потребления.

Таким образом, в результате проведения работы была спроектирована БС для СЭП первых СМКА, спроектирована базовая СЭП, обладающая более высокими характе-

Таблица б

	A					
Характеристики	Аккумуляторы космического применения	Аккумуляторы широкого потребления				
	SAFT MPS 126065	Duralite 7434	Duralite 7212			
Аккумуляторы						
Тип	Li-ion	Li-ion	Li-ion			
Емкость, Ач	5,6	4,3	1,9			
Разрядное напряжение, В	3,8	3,7	3,7			
Начальная энергоемкость, Вт · ч	20	15,91	7,03			
Масса, кг	0,15	0,102	0,061			
Удельная энергоемкость, Вт · ч/кг	133,3	156	115,2			
Стоимость, руб.	100 000	1 400	700			
Батареи						
Correr		2 АБ по 3	2 АБ 6			
Cocraв	5 аккумулятора	аккумулятора	аккумуляторов			
Начальная энергоемкость, Вт · ч	127,7	95,5	84,36			
Разрядное напряжение, В	11,4	11,1	22,2			
Масса, кг (с учетом 20 % запаса на корпус)	0,54	0,75	0,88			
Удельная энергоемкость, Вт · ч/кг	111	126	95,9			
Стоимость, руб. (с учетом 20 % запаса на корпус)	360 000	10 000	10 000			

## Характеристики аккумуляторов и АБ для СМКА

Таблица 7

### Характеристики стартовой и базовой СЭП

Система Характеристики схемы Характеристики Характеристики БС электропитания AБ Площадь, м<sup>2</sup> Стабильное Количество Масса, кг Средневитковая напряжение U, номинального мощность Р на напряжения U, B % теневой орбите, Вт СЭП первых КА 30 3.5 0.37  $16,1(11,3^*)$ 1 Базовая СЭП Любое 0,7-0,80.37  $19,0(13,0^*)$ 1

\* - в худшем случае, при нарушении ориентации СЭП.

ристиками, предложена программа летной отработки перспективных элементов СЭП.

## Библиографический список

 Структурная схема и схемотехнические решения комплексов автоматики и стабилизации СЭП негерметичного геостационарного КА с гальванической развязкой бортовой аппаратуры от солнечных и аккумуляторных батарей / С. А. Поляков, А. И. Чернышев, В. О. Эльман, В. С. Кудряшов; НПЦ «Полюс»; НПО ПМ им. ак. М. Ф. Решетнева. Железногорск, 2001.

2. Birchenough, G. The series connected buck boost regulator for high efficiency DC voltage regulation / G. Birchenough ; NASA. Glenn Research Center Cleveland, 2003.

3. Сайт The Saft Group [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.saftbatteries.com/. Загл. с экрана.

4. Интернет-магазин «Икс-моделс» [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://xmodels.ru/catalog/. Загл. с экрана.

P. I. Melnikov, R. V. Kozlov, V. S. Kudryashov

## POWER SUPPLY SYSTEM OF SMALL SATELLITE «STUDENT»

Interpretation results in designing power supply system of small satellite «Student» are expounded.

Keywords: power supply system, extreme regulation of power, bridge inverter, Li-ion battery, concentrators.

© Мельников П. И., Козлов Р. В., Кудряшов В. С., 2009

УДК 621.375.54

А. М. Михеенко, С. С. Абрамов, И. И. Резван

# К АНАЛИЗУ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГЕНЕРАТОРНЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Выполнен обобщенный анализ ключевого генератора высокой частоты, который позволяет оценить энергетические показатели генератора в широком диапазоне частот и параметров схемы.

Ключевые слова: бортовые устройства радиосвязи, генераторы класса «Д», энергетическая эффективность генератора.

В условиях освоения космических программ остро встает проблема обеспечения энергоресурсами автономных объектов, предназначенных для длительного пребывания на орбите или в межпланетном пространстве. Одним из путей обеспечения длительной работоспособности космических объектов является повышение энергетической эффективности основных потребителей бортовых электронных систем. В частности, это относится к мощным генераторным устройствам средств радиосвязи.

В мощных радиоустройствах достаточно широко использовался «бигармонический режим» генератора. С появлением мощной твердотельной электроники применение нашли двухтактные схемы последовательных резонансных инверторов (генераторы класса «Д») [1].

Возможность повышения КПД и мощности была обнаружена при работе генератора на расстроенную нагрузку еще в 1960-е гг. Е. П. Хмельницким [2]. Генераторы аналогичного типа в зарубежной литературе получили условное название «генератор класса Е», а в отечественной – «ключевой генератор с формирующим контуром» [3]. Несмотря на то что генераторы класса «Е» обеспечивают высокий КПД на предельных для ключевого режима частотах, в силу ряда причин их применение ограничивается пока стадией эксперимента. Цель настоящей работы – провести анализ энергетической эффективности генератора с формирующим контуром в самом общем виде, в широком диапазоне частот и параметров схемы.

Анализ схемы генератора. Упрощенная схема исследуемого генератора представлена на рис. 1.

Полагая, что отпирание и запирание активного элемента (АЭ) полностью определяется управляющим напряжением  $U_y$ , представим исследуемый генератор двумя эквивалентными схемами, отражающими процессы в генераторе при открытом и закрытом состоянии АЭ, где  $u_{\kappa} = U_{\kappa} \sin (\tau + \phi); \tau = \omega t; 2\theta -$ угол, соответствующий времени, в течение которого АЭ находится в открытом состоянии;  $i_{L1}$ ,  $i_L$  – токи во внешней цепи генератора, для соответствующих эквивалентных схем.

Дифференциальные уравнения для эквивалентных схем принимают вид

$$\frac{d^{2}i_{L}}{d\tau^{2}} + \frac{1}{r\omega C}\frac{di_{L}}{d\tau} + v^{2}i_{L} =$$

$$= \frac{v^{2}E}{r} - u_{k}(\frac{v^{2}\sin(\tau + \phi)}{r} + \frac{\cos(\tau + \phi)}{\omega L}),$$
(1)