

- ного типа. Показано, что с учетом суперпозиции магнитных полей вакуумно-дугового испарителя и плазменного фильтра, максимальная эффективность его работы достигается при пропускании по жалюзийным электродам постоянного тока 450 А.
- Для различных материалов установлены зависимости изменения скорости перемещения катодного пятна и ионно-эмиссионных свойств вакуумно-дугового разряда от магнитной индукции вблизи рабочей поверхности катода. Показано, что стабилизация разряда на поверхности катода достигается в диапазоне изменения индукции магнитного поля 40...70 Гс.
  - Рассмотрены варианты магнитных систем, обеспечивающих повышение ресурса работы ускорителя. Установлено, что максимальная выработка катода вакуумно-дугового испарителя достигается с использованием возвратно-поступательного перемещения катодного пятна и магнитопровода, формирующего продольное к поверхности катода магнитное поле.
- Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 09-08-12061-офи\_м.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Brown I.G., Anders A., Dickinson M.R., MacGill R.A., Monteiro O.R. Recent advances in surface processing with metal plasma and ion beams // *Rev. Sci. Instrum.* – 1999. – V. 112. – № 3. – P. 271–277.
- Ryabchikov A.I., Dektjarev S.V., Stepanov I.B. The metal vapor vacuum arc ion sources Raduga // *Rev. Sci. Instrum.* – 1994. – V. 65. – № 7. – P. 3126–31230.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B. Investigations of forming metal-plasma flows filtered from microparticle fraction in vacuum-arc evaporators // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998. – V. 69. – № 5. – P. 893–896.
- Степанов И.Б. Оптически непрозрачные системы жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции // *Известия вузов. Физика.* – 2007. – Т. 44. – № 10/3. – С. 16–24.
- Ryabchikov A.I., Stepanov I.B., Dektjarev S.V., Sergeev O.V. Vacuum arc ion and plasma source Raduga-5 for materials treatment // *Rev. Sci. Instrum.* – 1998. – V. 69. – № 5. – P. 810–814.

*Поступила 06.04.2010 г.*

УДК 629.78.01

## СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОРРЕКТИРУЮЩЕЙ ДВИГАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

С.Ю. Боязитов, В.Ф. Воструков, В.Е. Деев, Н.М. Катасонов, М.В. Михайлов, И.А. Подоплелов

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

*Рассмотрены особенности проектирования систем электропитания электроракетных плазменных двигательных установок, используемых для коррекции орбиты малых космических аппаратов. Показана возможность увеличения удельной мощности этих систем с помощью совмещения функций нескольких преобразователей электрической энергии, работающих последовательно, в одном. Приведены функциональная схема устройства, построенного на базе совмещенного преобразователя, его основные параметры, показан внешний вид.*

#### Ключевые слова:

*Система электропитания, электрореактивная двигательная установка, преобразователь электрической энергии.*

#### Key words:

*Power supply system, electrojet propulsion device, power transformer.*

В настоящее время широкое распространение получают малые космические аппараты (КА) [1]. Это связано с тем, что их вывод на орбиту обходится значительно дешевле, так как не требуются мощные, дорогостоящие ракетносители. Поскольку масса подобных КА не должна превышать 500 кг, то приоритетным становится снижение массы всех бортовых систем при сохранении высокого уровня надежности. Из-за ограниченной энерговооруженности и малых габаритов таких аппаратов необходимо не только обеспечить высокую удельную мощность, но и минимизировать потери в элемен-

тах схемы. Достичь этого можно совместными усилиями разработчиков всех систем, входящих в электрореактивную плазменную двигательную установку (ЭРПДУ) (двигатель, система газораспределения и система электропитания). Их задача – найти рациональную структуру каждой системы, т. е. определить минимальное количество узлов, достаточное для выполнения целевой функции при заданном уровне надежности, и оптимальное схемотехническое решение каждого узла. Кроме того, необходимо в заданных габаритах прибора разместить все конструктивные элементы узлов и обеспечить стой-

кость к внешним эксплуатационным воздействиям (температура, влажность, давление, механические удары, акустические шумы, радиация).

Для электропитания электроракетного плазменного двигателя (ЭРПД) используются четыре источника: стабилизатор напряжения разряда (СНР), стабилизатор тока нагревателя катода (СТНК), стабилизатор тока магнитной катушки (СТМК) и генератор поджигающих импульсов (ГПИ). Из циклограммы их работы (рис. 1) следует, что СТНК и, особенно, ГПИ работают кратковременно при запуске двигателя. Причем СНР в это время работает на холостом ходу (интервал  $t_1-t_3$ ) и по сути является нерегулируемым, так как тока разряда еще нет, а напряжение разряда в таком режиме допускается значительно выше, чем с работающим двигателем. Только на участке  $t_3-t_4$  источники работают параллельно, однако длительность этого промежутка составляет не более нескольких секунд и такой режим является пусковым, т. е. напряжение разряда может значительно отличаться от номинального значения.

Один из наиболее эффективных способов повысить удельную мощность системы электропитания ЭРПДУ, сохранив высокий уровень надежности, – совмещение функций нескольких преобразователей в одном [2]. Применительно к малым КА наиболее актуально совмещение функций СТНК и СНР, так как их выходные мощности близки.

СНР представляет собой преобразователь напряжения бортового источника в напряжение разряда анод – катод (рис. 2), обеспечивающий ограничение тока разряда в момент запуска (интервал  $t_4-t_5$  на рис. 1) и гальваническую развязку.

### Регулировочная характеристика СНР

$$U_{\text{вх}} = \frac{w_2}{w_1} \gamma_{\text{СНР}} \eta_{\text{СНР}} U_{\text{рх}},$$

где  $U_{\text{вх}}$  – напряжение разряда;  $w_1, w_2$  – количество витков первичной и вторичной обмоток;  $\gamma_{\text{СНР}}$  – коэффициент заполнения импульса СНР;  $\eta_{\text{СНР}}$  – КПД преобразователя (0,89...0,95);  $U_{\text{рх}}$  – напряжение питания.

Ток разряда пропорционален расходу рабочего вещества и в номинальном режиме работы не регулируется СНР, поэтому  $\gamma_{\text{СНР}}$  определяется отношением  $U_{\text{р.ном}}/U_{\text{рх}}$ , т. е. изменяется обратно пропорционально  $U_{\text{рх}}$  при постоянном значении  $U_{\text{р.ном}}$ .

СТНК представляет собой гальванически развязанный преобразователь напряжения бортового источника в стабилизированный ток нагревателя катода (НК) с датчиком тока НК (ДТНК), рис. 3.

### Регулировочная характеристика СТНК

$$I_{\text{НК}} = \frac{w_{2,\text{НК}}}{w_{1,\text{НК}}} \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{НК}}} \gamma_{\text{СТНК}} \eta_{\text{СТНК}},$$

где  $I_{\text{НК}}$  – требуемое значение тока НК;  $w_{1,\text{НК}}, w_{2,\text{НК}}$  – количество витков первичной и вторичной обмоток трансформатора НК;  $R_{\text{НК}}$  – сопротивление НК в разогретом состоянии;  $\gamma_{\text{СТНК}}$  – коэффициент заполнения импульса СТНК;  $\eta_{\text{СТНК}}$  – КПД СТНК (0,67...0,72).

Изменение  $\gamma_{\text{СТНК}}$  обусловлено изменением  $U_{\text{вх}}$  и увеличением  $R_{\text{НК}}$  по мере нагрева.

При совмещении СНР и СТНК  $\gamma_{\text{СТНК}} = \gamma_{\text{СНР}}$ , т. е.

$$\frac{I_{\text{НК}} R_{\text{НК}} w_{1,\text{НК}}}{U_{\text{вх}} w_{2,\text{НК}} \eta_{\text{СТНК}}} = \frac{U_{\text{р}} w_1}{U_{\text{вх}} w_2 \eta_{\text{СНР}}}. \quad (1)$$

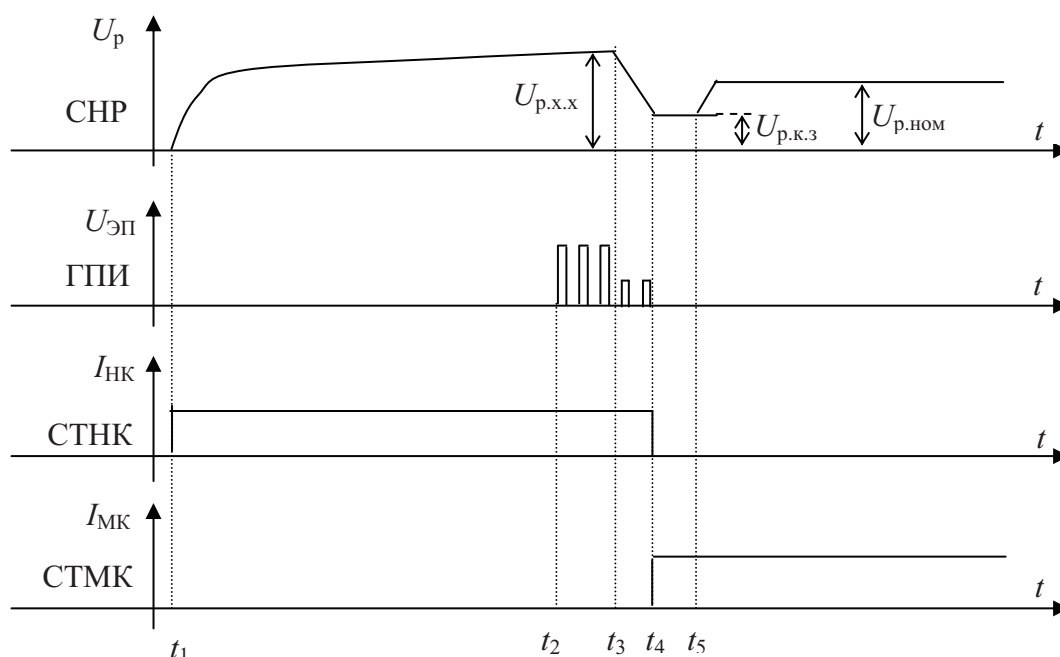


Рис. 1. Циклограмма работы СНР, ГПИ, СТНК и СТМК

Условие (1) можно записать в виде

$$\frac{I_{\text{HK}} R_{\text{HK}}}{n_{\text{HK}} n_{\text{СТНК}}} = \frac{U_p}{n_{\text{СНР}} n_{\text{СНР}}}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{HK}} = \frac{w_{2.\text{HK}}}{w_{1.\text{HK}}}$ ;  $n_{\text{СНР}} = \frac{w_2}{w_1}$ .

Очевидно, что условие (2) несложно выполнить, обеспечив коэффициенты трансформации  $n_{\text{СНР}}$  и  $n_{\text{HK}}$  с помощью необходимого количества витков  $w_{2.\text{HK}}$  и  $w_2$ .

Таким образом, регулировочная характеристика совмещенного устройства электропитания ЭРПД, включающего СНР и СТНК (рис. 4), должна иметь вид

$$U_p = \begin{cases} \gamma_{\text{HK}} U_{\text{вх}} n_{\text{СНР}} & \text{при } t_1 < t < t_4; \\ I_{\text{к.з.}} R_{\text{а-к}} & \text{при } t_4 < t < t_5; \\ \gamma_{\text{СНР}} U_{\text{вх}} n_{\text{СНР}} & \text{при } t > t_5, \end{cases}$$

где  $I_{\text{к.з.}}$  – максимально допустимое значение тока разряда  $I_p$ , при достижении которого преобразователь переходит в режим ограничения тока, напряжение разряда  $U_p$  при этом резко снижается;  $R_{\text{а-к}}$  – сопротивление газоразрядного промежутка анод – катод.

Силовая часть представляет собой два однотактных преобразователя, работающих в противофазе на общую нагрузку. Это позволяет увеличить КПД при работе с относительно низким входным

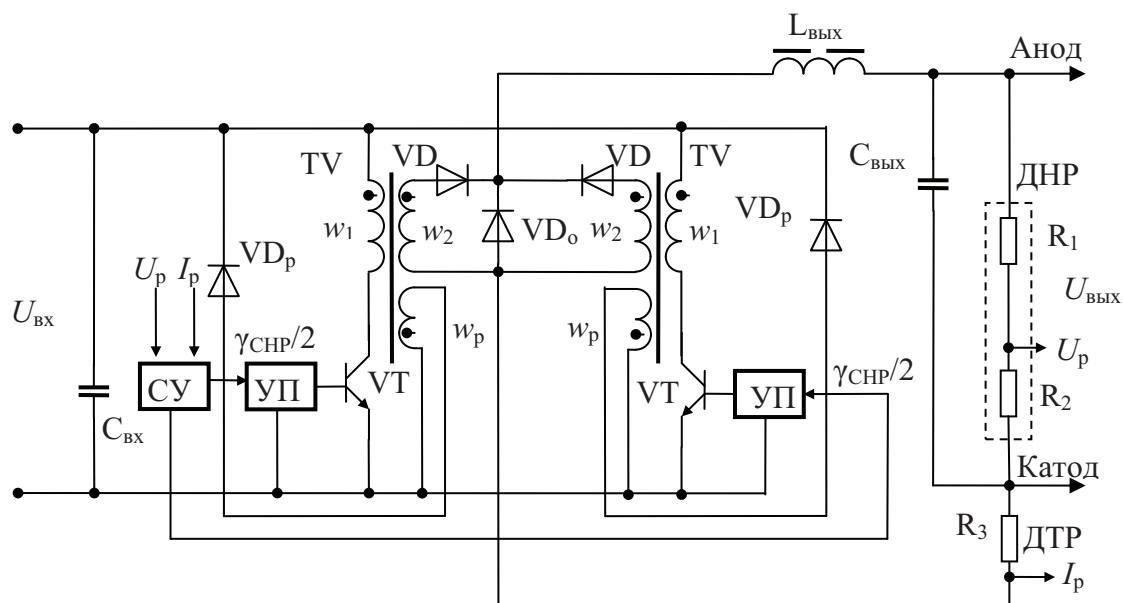


Рис. 2. Функциональная схема СНР: СУ – система управления; УП – предварительный усилитель; ДНР – датчик напряжения разряда; ДТР – датчик тока разряда

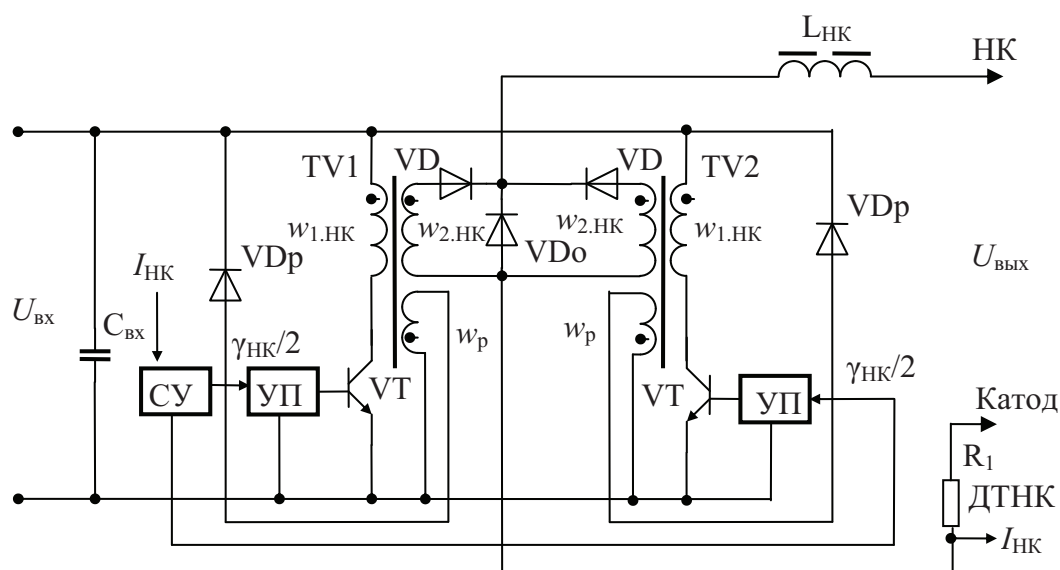


Рис. 3. Функциональная схема СТНК

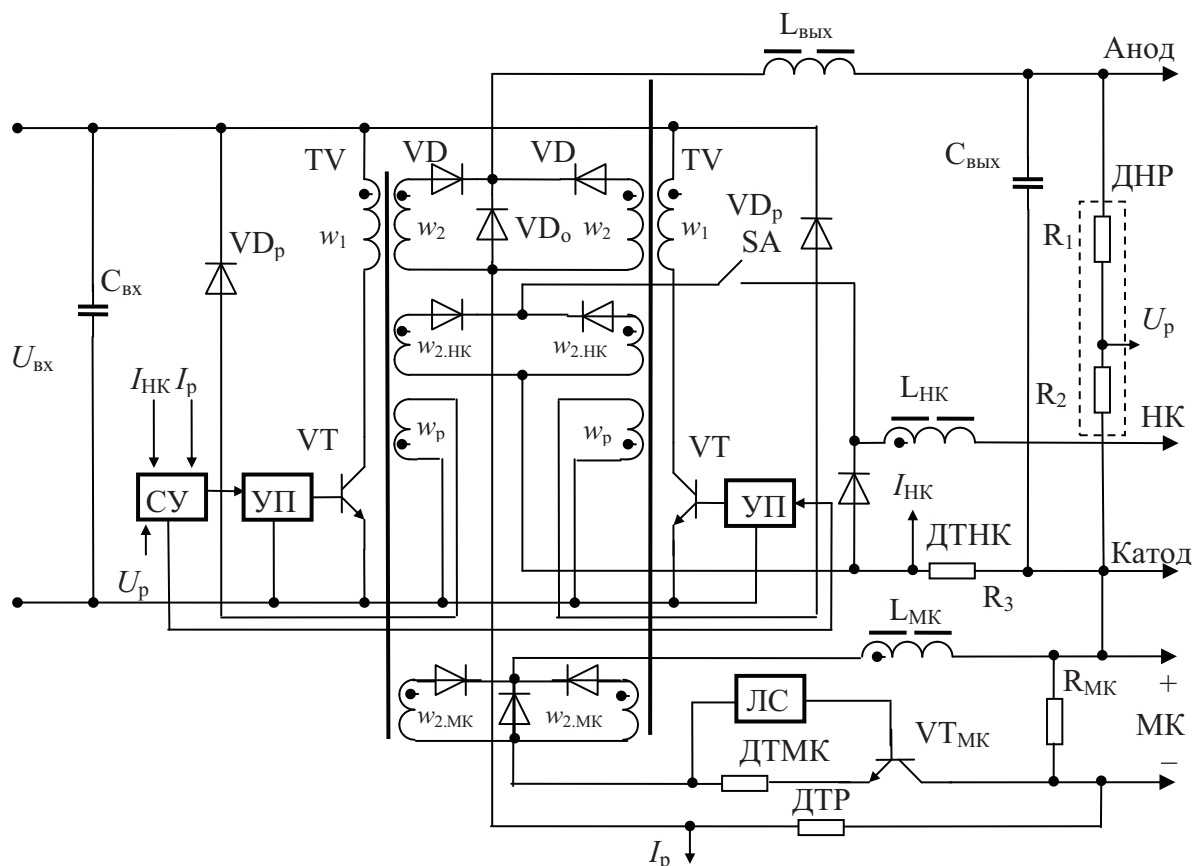


Рис. 4. Схема совмещенного устройства электропитания ЭРПД: ЛС – линейный стабилизатор; ДТМК – датчик тока магнитной катушки; МК – магнитная катушка

напряжением ( $U_{\text{вх}} < 50 \text{ В}$ ), поскольку используется минимальное количество силовых полупроводниковых элементов в первичной цепи и обеспечивается гарантированное размагничивание силовых трансформаторов TV, которые содержат три вторичные обмотки:  $w_2$  – высоковольтная для электропитания канала разряда анод – катод,  $w_{2,\text{НК}}$  – для электропитания НК и  $w_{2,\text{МК}}$  – для электропитания МК. Напряжения вторичных обмоток выпрямляются и через фильтры подаются на соответствующие нагрузки. Поскольку стабилизация напряжения разряда и тока дополнительного источника МК происходит одновременно, а сопротивление МК плавно возрастает по мере ее нагрева, для стабилизации тока дополнительного источника МК используется маломощный ЛС тока на базе транзистора  $VT_{\text{МК}}$ . Согласно циклограмме работы двигателя (см. рис. 1) устройство сначала стабилизирует ток НК (интервал  $t_1-t_4$ ), при этом напряжение анод – катод может изменяться в широких пределах (интервал  $t_1-t_3$ ), не превышая предельного значения  $U_{\text{р.х.х}}$ . После возникновения тока анод – катод СУ автоматически переходит в режим стабилизации напряжения разряда, а цепь тока НК разрывается ключом SA, при этом появляется ток МК. После запуска двигателя ток разряда может значительно превышать номинальное значение за счет избыточного количества рабочего тела в разрядной

камере. В этом случае приоритетным является сигнал с датчика тока разряда  $I_p$  (интервал  $t_4-t_5$ ). После прожига ток разряда снижается до номинального значения, и система переходит в режим стабилизации напряжения разряда ( $t_5...$ ).

Схема совмещенного устройства электропитания ЭРПД позволяет исключить силовой инвертор, УП и входной фильтр СТНК (см. рис. 3), тем самым существенно повысить удельную мощность системы электропитания ЭРПДУ. Недостатком схемы является необходимость установки ключа SA в цепь НК.

Для коррекции орбиты малых КА используются маломощные двигатели типа СПД-50 с номинальной тягой 1,4 г (140 мН) и мощностью потребления по цепи разряда 216...247 Вт. Для передачи такой мощности силовой инвертор целесообразно выполнять одной преобразовательной ячейкой [3].

На основании рассмотренной схемы была создана система СПУ-КВ, входящая в состав корректирующей двигательной установки КА «Канопус-Вулкан» (масса КА 450 кг), запуск которого планируется в 2010 г. В настоящее время система успешно выдержала стыковочные испытания с двумя двигателями СПД-50 и проходит испытания в составе КА. Система СПУ-КВ включает в себя два независимых канала, каждый из которых предназначен для электропитания одного СПД-50, регулятора расхода ра-

бочего вещества, шести клапанов, нагревателя блока хранения рабочего тела и двух пироклапанов. Помимо функции электропитания система СПУ-КВ формирует аналоговую телеметрическую информацию о напряжении и токе разряда, токе НК, МК и регулятора расхода рабочего вещества. Параметры системы СПУ-КВ приведены в таблице.

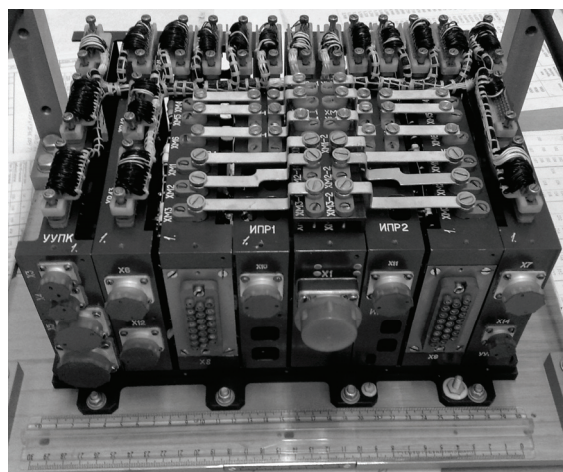
**Таблица.** Параметры системы СПУ-КВ

Наименование параметра	Требуемые значения	Условия
Напряжение питания $U_{вх}$ , В	24...34	–
Ток потребления $I_{вх}$ , А	8,5...12,2	В зависимости от $U_{вх}$
Ток нагревателя катода $I_{нк}$ , А	11,25...11,75	$R_{нк} = 0,60...0,73$ Ом
	11,0...12,0	$R_{нк} = 0,19...0,25$ Ом
Амплитуда поджигающих импульсов $U_{пз}$ , В	270...400	$R_{зп} = 9...11$ кОм
	22...33	$R_{зп} = 4,5...5,5$ Ом
Частота поджигающих импульсов $f_{пз}$ , Гц	130...160	–
Длительность импульсов $t_{пз}$ , мс	0,07...0,14	–
Напряжение разряда $U_p$ , В	180...190	Рабочий режим
	< 350	Режим подготовки
Ток разряда $I_p$ , А	1,2...1,3	Номинальный режим
	1,62...1,98	Режим защиты
Ток магнитной катушки $I_{МК}$ , А	1,3...1,4	$R_{МК} = 1,4...3,1$ Ом
Ток регулятора расхода $I_{р.р.}$ , А	1,3...1,4	Режим подготовки, $R_{р.р.} = 0,19...0,40$ Ом
	0; 3,6...4,0	Рабочий режим, $R_{р.р.} = 0,19...0,40$ Ом
Напряжение питания клапанов блока подачи ксенона и электроклапанов двигателя $U_{кл}$ , В	22,5...33	Напряжение открытия
	8...13	Напряжение удержания
Ток пироклапана $I_{пк}$ , А	>2,94	Время работы не более 10 мс
Мощность потребления системы СПУ-КВ $P_{вх}$ , Вт	<292	–
Задержка срабатывания защиты по току разряда $t_s$ , с	2...4	–
Потребляемый ток в режиме «молчания» $I_{мол}$ , мА	0	Разомкнут входной коммутатор
Погрешность аналоговой телеметрии, %	<5	–
Масса, кг	6,8	–

Конструктивно система изготовлена в виде двух блоков внегермоконтейнерного исполнения: УУП-КВ и БКП. Блок УУП-КВ предназначен для электропитания элементов двигательной установки и состоит из восьми модулей, расположенных на теплопроводящем основании и соединенных между собой системной шиной через межблочные разъемы типа РПММ (рис. 5). Блок БКП представ-

ляет собой электромеханический коммутатор шины питания «28 В». Для обеспечения хорошего теплоотвода в условиях открытого космоса и снижения массы системы корпуса модулей выполнены из сплава алюминия и магния АМг2М, а основание из магния МА2-1. Такая конструкция позволяет осуществлять теплоотвод  $0,25$  Вт/см<sup>2</sup>, масса блока УУП-КВ составляет 6,3 кг, а БКП – 0,5 кг. Соединение блоков осуществляется межблочным кабелем с разъемами типа РС.

Использование совмещенного преобразователя позволило значительно снизить массу системы СПУ-КВ по сравнению со схемой с двумя отдельными преобразователями СНР и СТНК. В результате удалось повысить удельную мощность системы не менее чем на 16 %. Правильность использованных схемотехнических и конструктивных решений подтверждена успешными стыковочными испытаниями с двигателями СПД-50 в вакуумной камере на стенде ОКБ «Факел» (г. Калининград).



**Рис. 5.** Вид блока УУП-КВ без кожуха

### Заключение

Эффективным способом снижения массы и повышения удельной мощности систем электропитания корректирующих двигательных установок малых космических аппаратов является совмещение функций нескольких источников электропитания в одном с поочередным обслуживанием выходных параметров – тока нагревателя катода, напряжения разряда и тока магнитной катушки, что позволяет исключить дополнительные маломощные преобразователи и повысить удельную мощность системы более чем на 16 %.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов В.С., Нестеришин М.В., Фалько М.Ю. Анализ технических решений для систем электропитания нано- и микроспутников // Электронные и электромеханические системы и устройства: Сб. науч. тр. – Новосибирск: Наука, 2007. – С. 23–30.
2. Система запуска и электропитания электрореактивного плазменного двигателя: пат. 2162623 Рос. Федерация. № 99107692; заявл. 05.04.1999; опубл. 27.01.2001, бюл. № 3.

3. Устройство запуска и электропитания электрореактивного плазменного двигателя: пат. 2265135 Рос. Федерация. № 2003110604; заявл. 14.04.2003; опубл. 27.11.2005, бюл. № 33.

Поступила 26.02.2010 г.