

## СИСТЕМА КОРРЕКЦИИ ОРБИТЫ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ «КАНОПУС-В»

А.В. Горбунов, В.П. Ходненко, А.В. Хромов  
(ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ»)

В.М. Мурашко, А.И. Корякин, В.С. Жосан, Г.С. Грихин  
(ФГУП ОКБ «Факел»)

В.Н. Галайко, Н.М. Катасонов  
(ОАО «НПЦ «Полюс»)

*Рассмотрена орбитальная группировка перспективного космического комплекса оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В», состоящая из двух одноплоскостных космических аппаратов, разведённых по фазе на  $180^\circ$  и находящихся на солнечно-синхронной орбите высотой 510 км. В состав КА «Канопус-В» включена корректирующая двигательная установка на базе стационарных плазменных двигателей СПД-50. Приведены состав и основные характеристики корректирующей двигательной установки, дано описание её функциональной схемы, и более полно представлена система преобразования и управления СПУ-КВ, обеспечивающая электропитание и логику работы корректирующей двигательной установки.*

**Ключевые слова:** корректирующая двигательная установка, космический аппарат, дистанционное зондирование Земли, стационарный плазменный двигатель, орбитальная группировка, система коррекции орбиты.

### Введение

Перспективный космический комплекс (КК) оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» предназначен для решения следующих основных задач:

- мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций, в том числе стихийных гидрометеорологических явлений;
- обнаружения очагов лесных пожаров, крупных выбросов загрязняющих веществ в природную среду;
- мониторинга сельскохозяйственной деятельности, природных (в том числе водных и прибрежных) ресурсов;
- землепользования;
- оперативного наблюдения заданных районов земной поверхности в интересах различных отраслей народного хозяйства.

КК «Канопус-В» имеет в своём составе орбитальную группировку (ОГ), состоящую из двух космических аппаратов (КА) «Канопус-В», находящихся в одной плоскости и разведённых по фазе на  $180^\circ$ .

Наличие ОГ, функционирующей на солнечно-синхронной орбите высотой 510 км, требует суммарных затрат характеристической скорости  $\Delta V_\Sigma = 80,1$  м/с для семилетнего срока активного существования КА.

Система коррекции орбиты КА «Канопус-В» (КДУ), предназначена для:

- осуществления начальной коррекции ошибок выведения КА на орбиту;
- формирования ОГ КА с разведением аппаратов по фазе на  $\varphi = 180^\circ$ ;

- проведения текущей коррекции, направленной на компенсацию тормозящего воздействия атмосферы;
- осуществления текущей коррекции, связанной с поддержанием углового расположения КА по аргументу широты.

### Энергетические затраты на проведение коррекции

Необходимые суммарные энергетические затраты на проведение соответствующих видов коррекции орбитальных параметров КА «Канопус-В» по расчётным оценкам составляют 30,59 кН·с (33,65 кН·с с учётом 10% разброса тяги по абсолютной величине) (табл. 1).

*Таблица 1*

### Энергетические затраты на проведение коррекции орбиты КА «Канопус-В» в течение 7 лет

Параметры коррекции	Величина корректирующего параметра	Необходимый импульс тяги, кН·с
Начальный период обращения, $\Delta T$	4 с	0,82
Начальное наклонение, $\Delta i$	$2^\circ$	2,16
Начальный эксцентриситет, $\Delta e$	0,0008	1,48
Начальный аргумент перигея, $\omega$	$40^\circ$	2,09
Разведение по фазе на $\varphi = 180^\circ$	5 с	$1,04 \times 2$
Поддержание периода, $\Delta T$	48,2 с	9,88
Поддержание наклонения, $\Delta i$	$7^\circ$	7,35
Коррекция положения плоскости орбиты	$4,8^\circ$	4,73
Суммарные энергетические затраты	30,59 кН·с (33,65 кН·с с учётом 10% разброса тяги)	

### Сравнение различных типов корректирующих двигательных установок

Исходя из гарантированного значения суммарного импульса тяги  $I_{\Sigma} = 40$  кН·с рассмотрены различные варианты исполнения КДУ (как зарубежных, так и отечественных фирм).

В табл. 2 приведены характеристики различных типов КДУ применительно к использованию на КА «Канопус-В».

#### Корректирующая двигательная установка КА «Канопус-В»

Для КА «Канопус-В» была выбрана с учётом достигнутых характеристик и степени отработанности в натуральных условиях КДУ на базе стационарных плазменных двигателей СПД-50 [1] разработки ФГУП ОКБ «Факел» (Россия, г. Калининград).

КДУ КА «Канопус-В» содержит следующие блоки:

– два двигателя СПД-50 (рис. 1) (один из которых является резервным), обеспечивающие создание корректирующего импульса тяги;

– два модуля газораспределения (МГР-50) (рис. 2) для обеспечения подачи ксенона в основной и резервный двигатели СПД-50 соответственно;

– блок подачи ксенона (БПК) (рис. 3), содержащий основную и резервную ветви подачи ксенона в МГР-50;

– блок хранения ксенона (БХК) (рис. 4), обеспечивающий хранение запаса ксенона и его подачу в БПК;

– систему преобразования и управления (СПУ-КВ), предназначенную для электропитания и управления блоками КДУ.

Два двигателя СПД-50, два модуля газораспределения, блок подачи ксенона, межблочные трубопроводы с ресивером конструктивно объединены в блок коррекции орбиты БКО КА (рис. 5).

Основные характеристики КДУ	
Энергопотребление, Вт	317
Номинальная тяга, Гс (мН)	1,4 (14)
Номинальный удельный импульс тяги, с	850
Ресурс по времени работы, ч	800
Ресурс по количеству включений	2000
Масса не заправленной КДУ, кг	19,2
Масса заправляемого ксенона, кг	5,2
Общий гарантийный срок, лет	10
Срок активного существования, лет	7



Рис. 1. Стационарный плазменный двигатель (СПД-50)

Таблица 2

#### Характеристики корректирующих двигательных установок

Характеристика	КДУ на ксеноне фирмы SSTL	КДУ на воде фирмы SSTL	Аммиачная КДУ разработки ОАО «НИИЭМ»	КДУ с АИПД на фторопласте разработки ФГНУ «НИИПМЭ»	Гидразиновая КДУ с ТКД разработки ФГУП ОКБ «Факел»	КДУ на ксеноне с СПД разработки ФГУП ОКБ «Факел»
Суммарный импульс тяги, кН·с	40	40	40	40	40	40
Удельный импульс, с	60	152	164	1700	208	900
Величина тяги, Гс (мН)	1,0 ... 4,0 (10 – 40)	4,5 (45)	4,0 (40)	0,25 ... 0,35 (2,5 – 3,5)	10 (100)	1,5 (15)
Потребляемая мощность, Вт	80	100	100	100	~30	~300
Масса рабочего тела, кг	67	27	24,4	2,5	19,2	4,4
Полная масса, кг	90	40	36,5	17,5	45	25

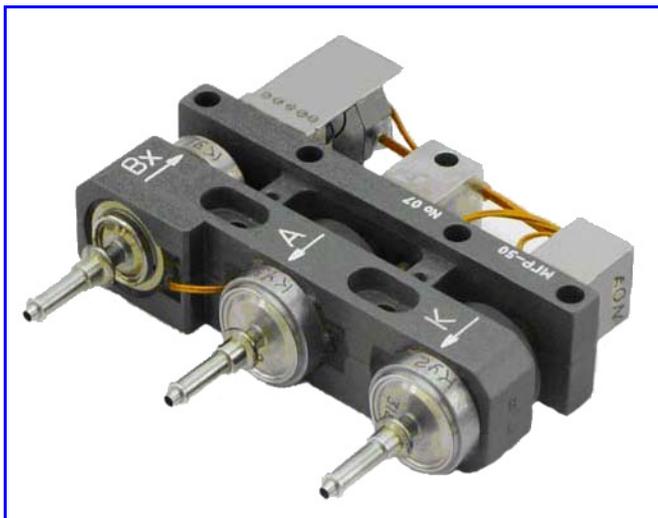


Рис. 2. Модуль газораспределения (МГР-50)



Рис. 3. Блок подачи ксенона (БПК)



Рис. 4. Блок хранения ксенона (БХК)



Рис. 5. Блок коррекции орбиты (БКО)

Функциональная схема КДУ приведена на рис. 6. Необходимо отметить, что СПУ-КВ с элементами КДУ имеет только электрические связи, обозначенные на схеме, и в виде отдельного блока не показана.

БХК содержит два шар-баллона с ксеноном (ШБ1 и ШБ2), два пироклапана (ПК1 и ПК2), параллельно установленные в тракте подачи ксенона, датчик температуры (ВК) и заправочную горловину (ГЗ). Подача ксенона из БХК в БПК осуществляется после подрыва ПК1 и ПК2 по межблочному трубопроводу высокого давления (МБТ1), включающему проверочную горловину (ПУ1).

БПК содержит две независимые ветви подачи ксенона. В процессе работы КДУ задействована одна из ветвей, вторая находится в

резерве. Каждая из ветвей БПК содержит по тракту подачи ксенона клапан ЭК1 (ЭК3), выполняющий роль отсечного, механический регулятор давления РД1 (РД2) и клапан подачи ЭК2 (ЭК4). Механический регулятор давления осуществляет редуцирование давления ксенона от переменного высокого на входе (~110 кг/см<sup>2</sup>) до низкого постоянного на выходе (1 – 6 кг/см<sup>2</sup>). На каждом РД1 (РД2) установлен нагреватель (ЕК), обеспечивающий необходимый температурный режим, и телеметрический датчик температуры ВК1 (ВК2). В каждой ветви подачи ксенона за отсечным клапаном на входе в РД1 (РД2) установлен телеметрический датчик высокого давления ВР1 (ВР3).

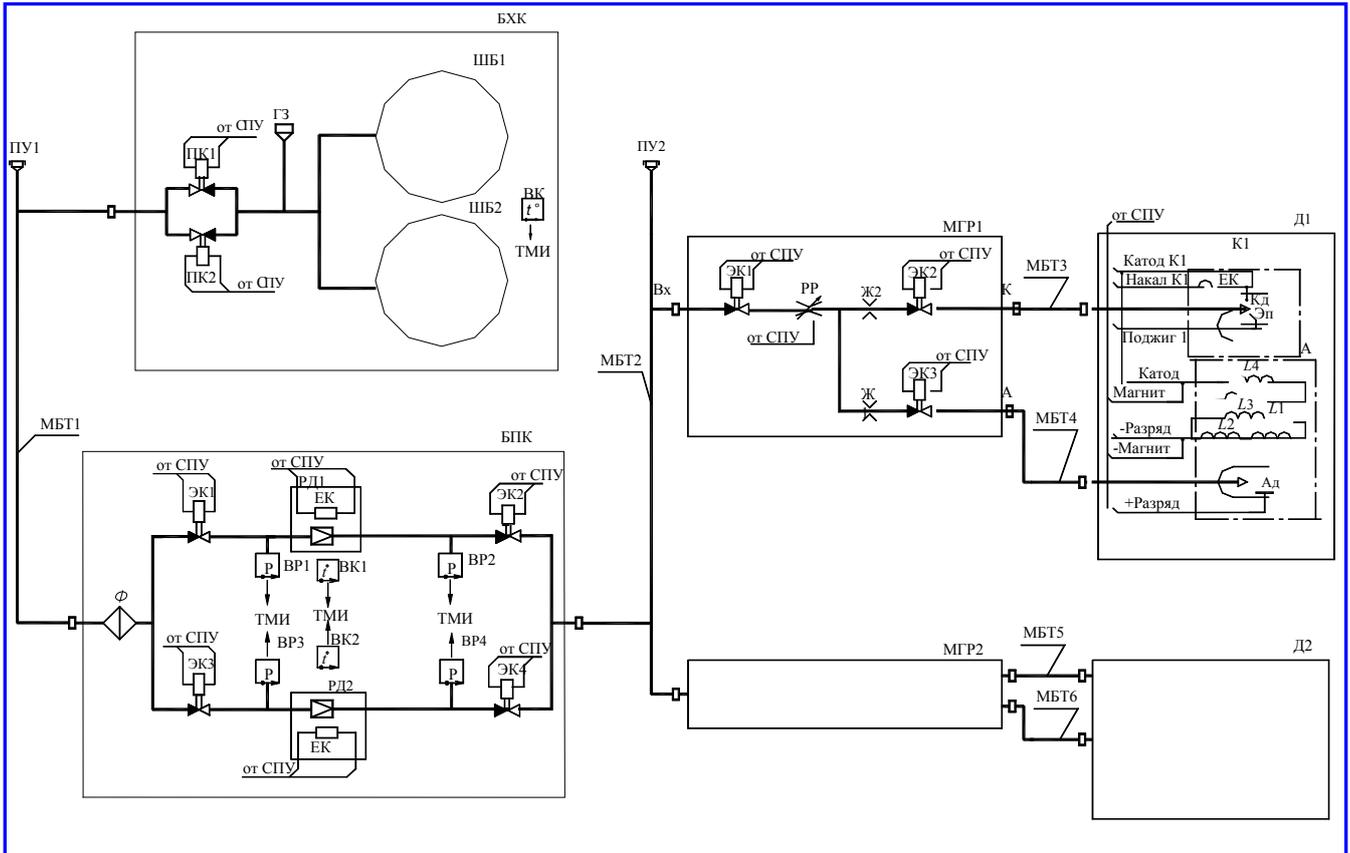


Рис. 6. Функциональная схема КДУ КА «Канопус-В»

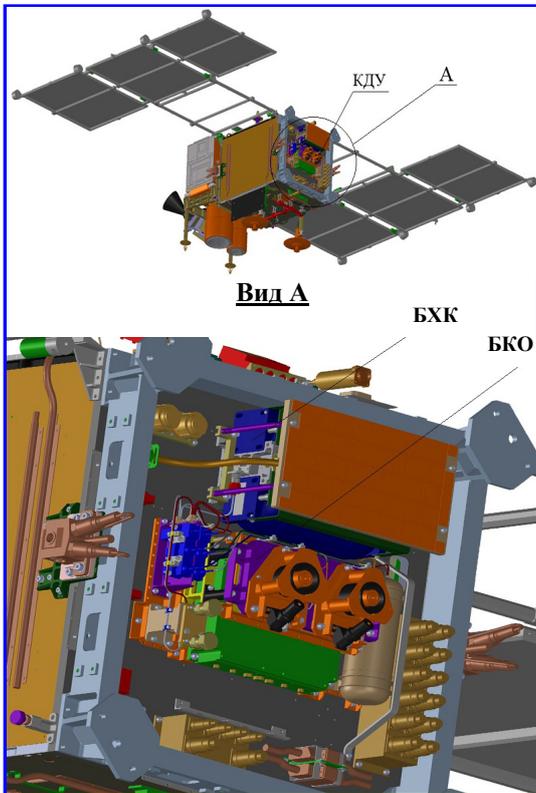


Рис. 7. КА «Канопус-В» с КДУ

На выходе РД1 (РД2) установлен телеметрический датчик низкого давления ВР2 (ВР4). Подача ксенона из БПК в МГР-50 (МГР1, МГР2) осуществляется по межблочному трубопроводу низкого давления (МБТ2), включающему проверочную горловину (ПУ2).

МГР-50 (МГР1, МГР2) обеспечивает подачу ксенона в анодный (А) и катодный (К) тракты двигателя СПД-50 (Д1, Д2) с требуемым значением расхода ксенона по межблочным трубопроводам МБТ3 и МБТ4 (МБТ5 и МБТ6). Каждый МГР-50 по тракту подачи ксенона содержит на входе клапан подачи ЭК1 и на выходе отсечные клапаны ЭК2, ЭК3. Установленные в МГР-50 регулятор расхода (РР) и жиклеры (Ж1 и Ж2) обеспечивают необходимый уровень расхода ксенона в анод (А<sub>д</sub>) и катод (К<sub>д</sub>) двигателя СПД-50 в зависимости от величины тока разряда.

Двигатель СПД-50 (Д1, Д2) обеспечивает создание корректирующего импульса тяги за счёт взаимодействия заряженных частиц плазмы с взаимно-перпендикулярными продольным электрическим и радиальным магнитным полями, создаваемыми в коаксиальном канале разрядной камеры двигателя. Каждый СПД-50 содержит катодный (К) и анодный (А) блоки. Катодный блок содержит непосредственно К<sub>д</sub>, ЕК и поджигной электрод Эп. Анодный блок содержит непосредственно анод А<sub>д</sub> и катушки магнитной системы (L1 ... L4).

Общий вид КА «Канопус-В» с установленной на нём КДУ представлен на рис. 7.

Необходимо отметить, что СПУ-КВ является важным элементом КДУ, обеспечивающим её электропитание и логику работы.

Она построена в соответствии с электропневматической принципиальной схемой КДУ и состоит из функциональных модульных конструктивов (рис. 8).

Модули коммутатора шины питания (МКП), преобразования (МП) и управления подачей ксенона (МУПК) являются общими, функционируют при работе как двигателя Д1, так и двигателя Д2. Модули питания разряда (МПР), запуска двигателя (МЗД) и управления газораспределением (МУГР) с номером 1 обслуживают работы только двигателя Д1, с номером 2 – только двигателя Д2.

В основу СПУ-КВ положена система запуска и электропитания с многоканальным преобразователем напряжения и общей схемой управления на основе ШИМ-контроллера [2]. ШИМ – контроллер обеспечивает стабилизацию по каждому из каналов:

- тока нагревателя катода  $I_{н.к} = \varphi(U_{пит}, R_{н.к})$ ;
- напряжения разряда  $U_p = \varphi(U_{пит})$  при стабилизированном расходе рабочего вещества;
- дополнительного тока магнитных катушек  $I_{доп.м.к} = \varphi(U_{пит})$ .

По каналу разряда тем же ШИМ-контроллером осуществляется ограничение тока разряда  $I_{р.орг}$  в режиме аномальной проводимости канала разряда  $G_{р.ан}$

на заданном уровне в соответствии с функциональной зависимостью:

$$I_{р.орг} = \varphi(U_{пит}, G_{р.ан}).$$

Поскольку нагрев катода и рабочий режим разряда разнесены во времени, то стабилизация  $I_{н.к}$ ,  $U_p$  и  $I_{р.орг}$  обеспечивается изменением длительности импульсов переменного напряжения инвертора, формируемых общим ШИМ-контроллером согласно соотношениям:

$$t_U^* = \begin{cases} \frac{R_{н.к}^*}{U_{пит}^*}, I_{н.к} = \text{const}; \\ \frac{1}{U_{пит}^*}, U_p = \text{const}; \\ \frac{1}{G^* U_{пит}^*}, I_{р.орг} = \text{const}, \end{cases}$$

где  $t_U^* = 2ft_U$  – относительная длительность импульсов напряжения инвертора;  $f$  – частота преобразования напряжения;  $U_{пит}^* = \frac{U_{пит}(t)}{U_{пит.мин}}$  – относительное напряжение электропитания КДУ;

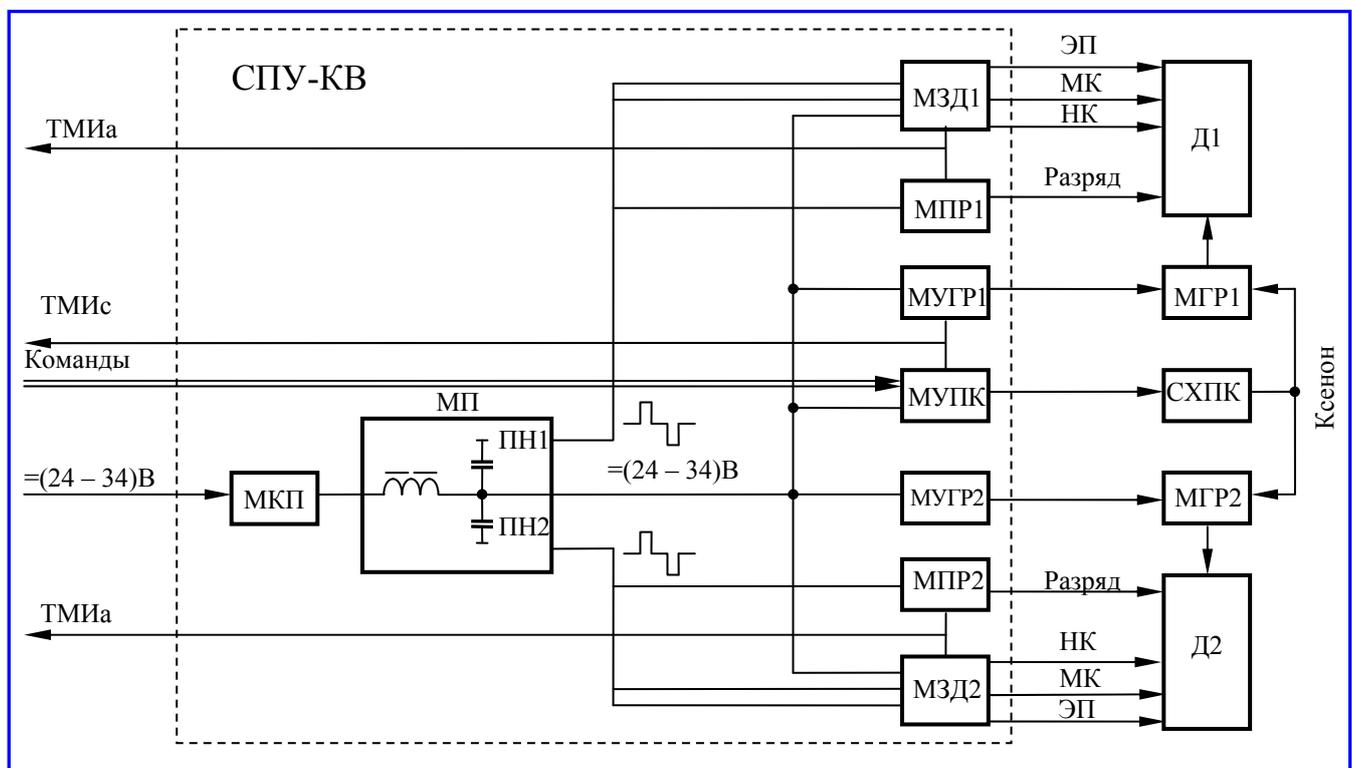


Рис. 8. Функциональная схема СПУ-КВ

$R_{н.к}^* = \frac{R_{н.к}(t)}{R_{н.к.макс}}$  – относительное сопротивление на-

гревателя катода;  $G_{р.ан}^* = \frac{G_{р.ан}(t)}{G_{р.ан.мин}}$  – относительная проводимость канала разряда в аномальном режиме.

Минимальная проводимость канала разряда в аномальном режиме определяется соотношением

$$G_{р.ан.мин} = \frac{I_{р.огр}}{U_p}$$

При аномальном режиме проводимости требования к стабильности  $U_p$  не предъявляются.

Стабилизация дополнительного тока магнитных катушек в функции от  $U_{пит}$  обеспечивается при стабилизации  $U_p$ , а в зависимости от изменения суммарного сопротивления магнитных катушек  $R_{м.к}$  – непрерывным стабилизатором тока. Благодаря этому пульсации дополнительного тока магнитных катушек минимальны.

Электропитание нагревателя, катода разряда и магнитных катушек каждого двигателя осуществляется от отдельного преобразователя напряжения (ПН) с трёхканальным выходом, выполненного по псевдодвухтактной схеме из одноканальных преобразователей. Установленная выходная мощность потребителей в переходном режиме запуска двигателя:

$$P_{п.н.рз} = I_{н.к}^2 R_{н.к} + 0,65 I_p U_p,$$

где 0,65 – коэффициент тока разряда  $I_p$ , соответствующий выходу двигателя на рабочий режим.

Суммарная выходная мощность преобразователя в рабочем режиме двигателя:

$$P_{п.н.рз} = I_p U_p + (I_{доп.мк} + I_p) R_{м.к}.$$

В СПУ-КВ номинальные значения суммарной выходной мощности трёхканального преобразования в режиме запуска и рабочем режиме составляют соответственно 250 и 242 Вт.

Необходимо отметить, что использование в СПУ-КВ многоканального преобразования напряжения с общим ШИМ-контроллером, совмещающим функции стабилизации параметров электропитания по каждому из выходов преобразователя, позволило обеспечить приемлемую массу и габариты СПУ-КВ.

Электропитание нагревателей регуляторов давления системы хранения и подачи ксенона СХПК и электроклапанов КДУ в режиме удержания осуществляется от вспомогательного источника питания, выполненного по схеме автогенератора с многоканальным выходом. Формирование тока термодросселя дежурного и рабочего режимов обеспечивается индивидуальным преобразователем – регулятором тока.

Наряду с согласованием электропитания потребителей электроэнергии КДУ СПУ-КВ осуществляет прием и исполнение 22 команд управления, формирование и выдачу аналоговой (10 команд) и сигнальной (6 команд) телеметрической информации.

### Литература

1. Overview of Electric Propulsion Activities in Russia / V. Kim, V. P. Khodnenko, G. A. Popov [at al.] // 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. Florence, Italy, September 17 – 20, 2007. – Florence, 2007. – IERP -2007-275.
2. Пат. 2162623 Российская Федерация. МПК Н 05 Н 1/54, F 03 Н 1/00. Система запуска и электропитания электрореактивного плазменного двигателя / Катасонов Н. И.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственный центр «Полус». – № 99107692/06; заявл. 05.04. 1999, опублик. 27.01.2001. – 7 с.

Поступила в редакцию 16.01.2012

**Александр Викторович Горбунов**, канд. техн. наук, заместитель генерального директора – генерального конструктора, т. (495) 623-41-81, (495) 366-00-56.

**Владимир Павлович Ходненко**, д-р техн. наук, главный научн. сотрудник, т. (495) 624-94-98.

**Александр Викторович Хромов**, аспирант, начальник лаборатории, т. (495) 607-25-35.

E-mail: vniiem@orc.ru.

**Вячеслав Михайлович Мурашко**, канд. техн. наук, генеральный конструктор, т. (4012) 55-67-00.

**Александр Иванович Корякин**, заместитель генерального конструктора, т. (495) 55-66-01.

**Валерий Семёнович Жосан**, начальник отдела, т. (4012) 55-66-10.

**Геннадий Сергеевич Грихин**, заместитель начальника отдела, т. (4012) 55-69-23.

E-mail: fake@gazinter.net.

**Владимир Николаевич Галайко**, начальник лаборатории, т. (3822) 56-05-55.

**Николай Михайлович Катасонов**, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник, т. (3822) 56-05-55.

E-mail: polus@online.tomsk.net.