

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° 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° .

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, ΔT	4 с	0,82
Начальное наклонение, Δi	2°	2,16
Начальный эксцентриситет, Δe	0,0008	1,48
Начальный аргумент перигея, ω	40°	2,09
Разведение по фазе на $\varphi = 180^\circ$	5 с	$1,04 \times 2$
Поддержание периода, ΔT	48,2 с	9,88
Поддержание наклонения, Δi	7°	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

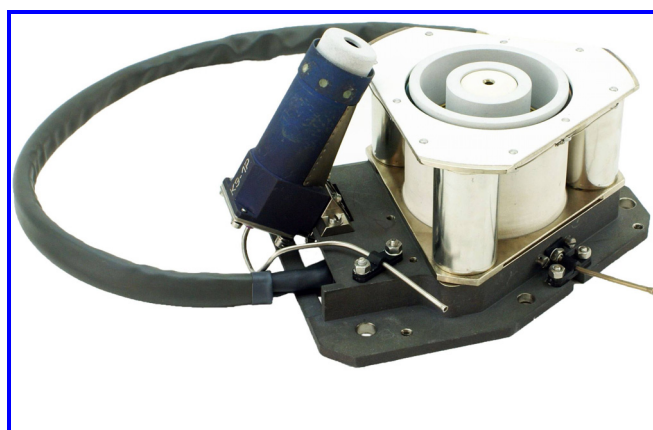


Рис. 1. Стационарный плазменный двигатель (СПД-50)

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

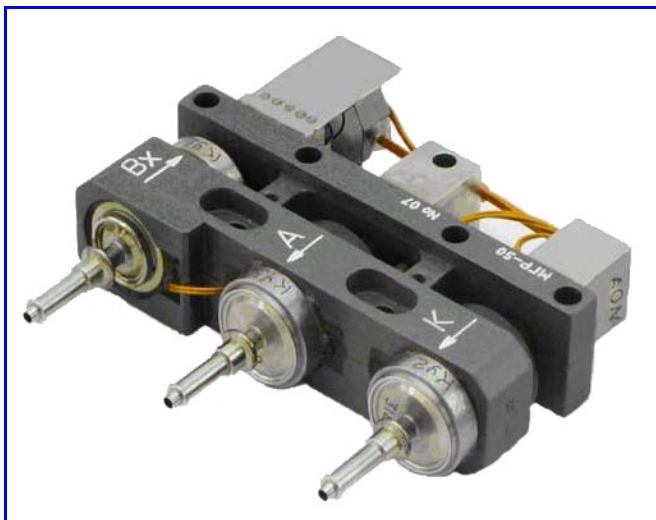


Рис. 2. Модуль газораспределения (МГР-50)



Рис. 3. Блок подачи ксенона (БПК)



Рис. 4. Блок хранения ксенона (БХК)

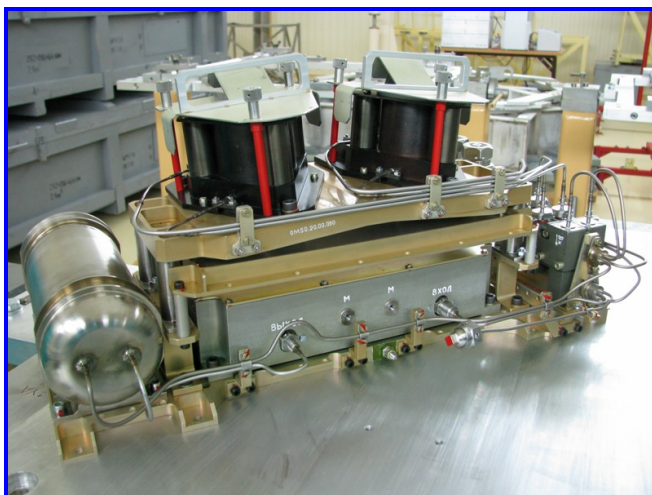


Рис. 5. Блок коррекции орбиты (БКО)

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/см²) до низкого постоянного на выходе (1 – 6 кг/см²). 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).

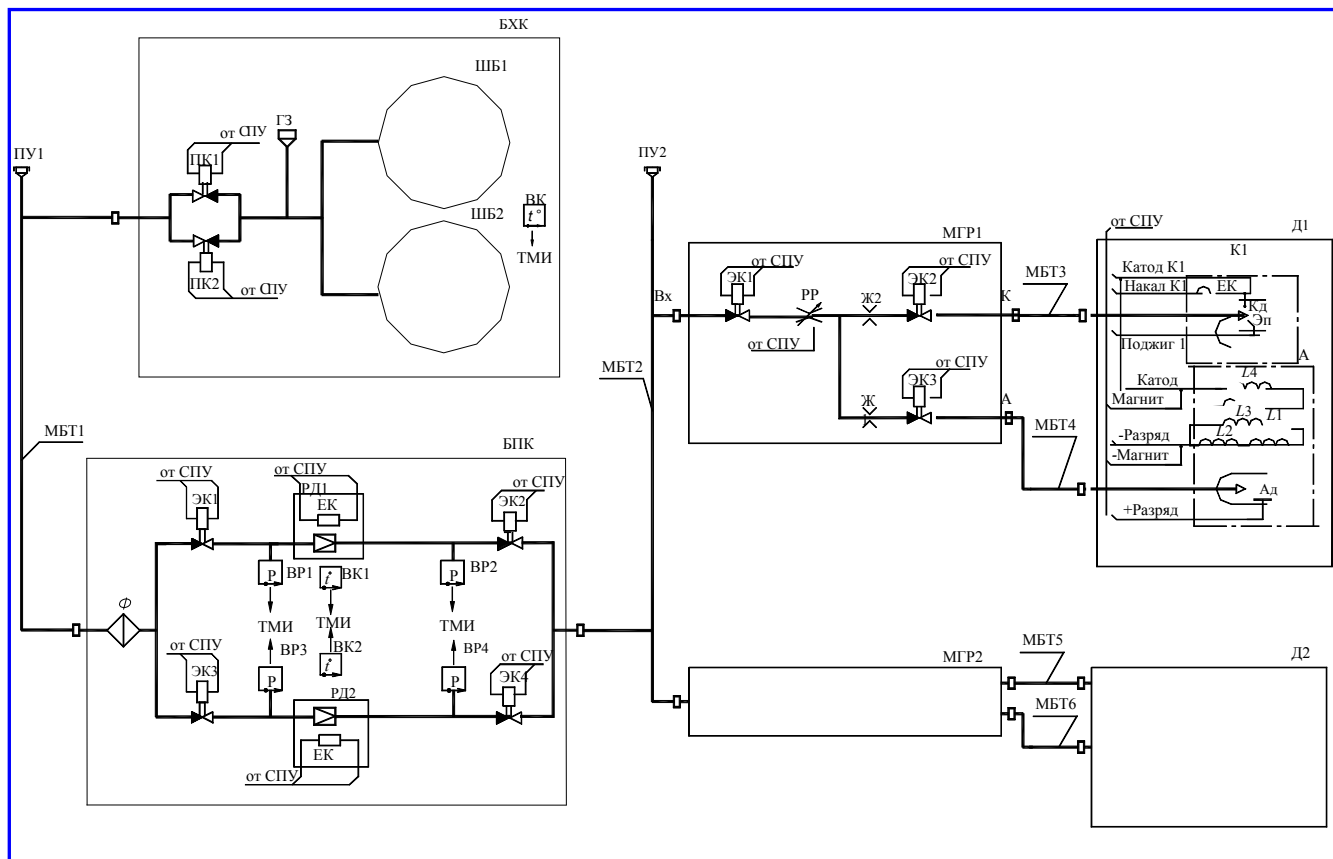


Рис. 6. Функциональная схема КДУ КА «Канопус-В»

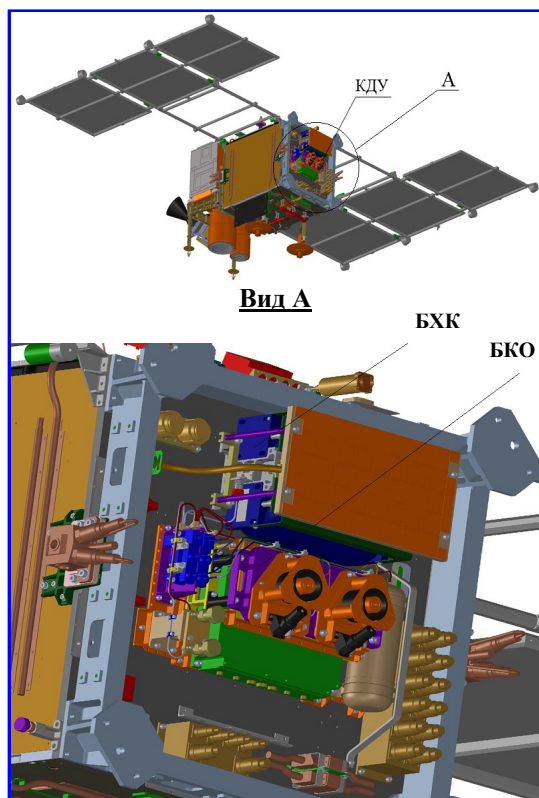


Рис. 7. КА «Канопус-В» с КДУ

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_д) и катод (К_д) 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_д, ЕК и поджигной электрод Эп. Анодный блок содержит непосредственно анод А_д 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;

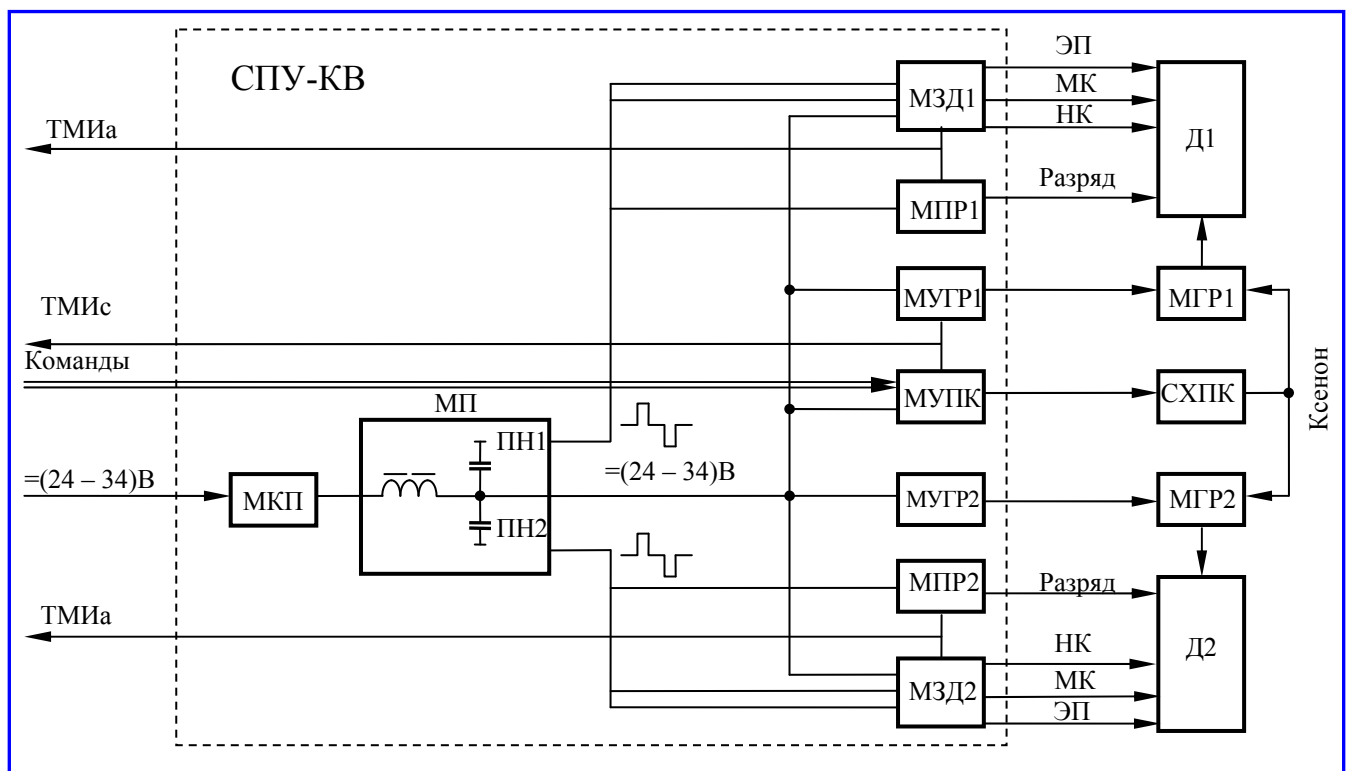


Рис. 8. Функциональная схема СПУ-КВ

$R_{н.к}^* = \frac{R_{н.к}(t)}{R_{н.к.макс}}$ – 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 [et al.] // 30th 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 «Полос». – № 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.