

## КОРРЕКТИРУЮЩАЯ ДВИГАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА С РЕГУЛИРУЕМОЙ ТЯГОЙ

**В.А. Лесневский**  
(ФГУП «ОКБ» Факел)

**М.В. Михайлов**  
(ОАО «НПЦ «Полюс»)

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

*Рассмотрены особенности применения корректирующих двигательных установок на базе стационарного плазменного двигателя с регулируемой тягой за счёт изменения разрядного напряжения. Приведены зависимости тяги и удельного импульса различных двигателей от напряжения разряда. С помощью математического моделирования проведена оценка целесообразности применения двигательной установки с регулируемой тягой на борту малого космического аппарата «Канопус-В» при изменении параметров системы электропитания КА в ходе лётной эксплуатации. Отмечено влияние разрядного напряжения на тепловые параметры двигателя и его износ. Отражены особенности конструкции системы преобразования и управления стационарным плазменным двигателем при различных законах регулирования тяги.*

**Ключевые слова:** космический аппарат, корректирующая двигательная установка, стационарный плазменный двигатель, система электропитания, система преобразования и управления.

В настоящее время электроракетные двигательные установки на базе стационарных плазменных двигателей (СПД) получили широкое распространение для коррекции орбиты космических аппаратов (КА) различного назначения. Основной характеристикой подобных установок является тяга, которая обеспечивает движение КА в заданном направлении. В зависимости от массы КА и высоты его орбиты разработчики определяют требуемое значение тяги, время и цикличность работы установки. В табл. 1 показаны основные типы СПД, используемые в составе современных корректирующих двигательных установок (КДУ), их тяга и предельная масса КА.

Принцип создания тяги основан на взаимодействии продольного электрического поля, создаваемого напряжением разряда анод-катод, и поперечного магнитного поля, создаваемого током через магнитные катушки [1]. В установившемся режиме работы двигателя ток разряда определяется расходом рабочего тела (ксенона) и практически не зависит от напряжения разряда, а тяга определяется выражением

$$F = \dot{m} \sqrt{\frac{2U_p \eta_r}{k_p}},$$

где  $\dot{m}$  – секундный расход рабочего тела;  $U_p$  – напряжение разряда анод-катод;  $\eta_r$  – тяговый КПД двигателя;  $k_p$  – величина, характеризующая количество рабочего тела, которое необходимо затра-

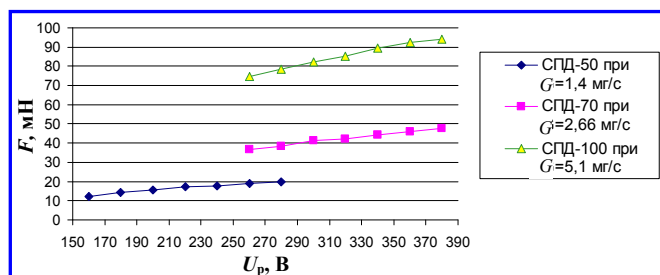
тить, чтобы получить ток разряда 1 А (для СПД, работающего на ксеноне,  $k_p = 1,1$  мг/с·А).

На сегодняшний день во всех эксплуатируемых российских КДУ на базе СПД тяга – постоянная величина, что обеспечивается стабилизацией секундного расхода  $\dot{m}$  и ускоряющего напряжения  $U_p$ . Это позволяет точно рассчитать необходимое время работы КДУ при каждом включении и суммарное приращение характеристической скорости КА. Однако такой подход не рационален, поскольку не учитывает изменения характеристик системы энергопитания КА, что приводит к увеличенному расходу  $\dot{m}$  и как следствие к увеличению массы баков с рабочим телом и аппарата в целом, а также требует существенных затрат времени на проведение коррекции. Избежать указанных недостатков можно с помощью регулирования тяги.

Источником электроэнергии на борту КА является солнечная батарея (СБ), для хранения энергии на теневом участке витка используется аккумуляторная батарея (АБ). В начале срока эксплуатации энерговооружённость КА достаточно высокая, со временем СБ деградирует, а АБ теряет ёмкость, и к концу срока службы вырабатываемая и запасаемая мощность становится минимальной.

Таблица 1

| Двигатель | Тяга, мН    | Масса КА, кг |
|-----------|-------------|--------------|
| СПД-50    | 12,6 – 15,4 | до 500       |
| СПД-70    | 36 – 44     | 500 – 1500   |
| СПД-100   | 72 – 88     | 1500 – 3500  |



Зависимость тяги СПД от разрядного напряжения

Именно на этот случай рассчитываются все параметры КА, включая тягу. Отсюда следует, что в начале эксплуатации тягу КДУ целесообразно сделать выше за счёт увеличения напряжения разряда  $U_p$ , а секундный расход  $\dot{m}$  оставить без изменения.

Тогда тяга двигателя возрастет пропорционально  $\sqrt{\Delta U_p}$ , при этом время работы установки, а следовательно и суммарный расход ксенона, уменьшится при сохранённом суммарном импульсе.

Следует отметить, что для любой модели стационарного плазменного двигателя с выбранным типоразмером, типичным поведением является то, что с увеличением разрядного напряжения при неизменном расходе рабочего тела его тяга и удельный импульс повышаются. На рисунке представлены результаты измерения тяги двигателей различных типоразмеров с увеличением разрядного напряжения при номинальном токе разряда и постоянном расходе рабочего тела через ускорительный канал.

Оценим возможность и рациональность применения КДУ с регулируемой тягой на примере малого КА «Канопус-В», входящего в соответствующий космический комплекс [2]. КДУ данного КА предполагается использовать для коррекции периода обращения, наклона орбиты, её эксцентриситета и аргумента перигея, а также для разведения по фазе двух КА, находящихся в одной плоскости. Все виды коррекции можно разделить на две группы:

- коррекция периода обращения, разведение по фазе – одно включение КДУ на витке максимально возможной длительности;
- коррекция наклона, аргумента перигея, эксцентриситета – два включения КДУ на витке продолжительностью порядка 16 мин каждое, разнесённые по фазе на 180°.

Номинальная тяга двигателя СПД-50, находящегося на борту КА «Канопус-В», составляет 13,7 мН, номинальная мощность потребления КДУ – 316 Вт при токе разряда 1,25 А.

Особенностью построения системы электропитания (СЭП) является разделение СБ на 18 генераторов, каждый из которых связан с модулем зарядки батареи, фактически образуя ячейку СЭП. Характер деградации мощности СБ и ёмкости АБ существенно отличается. Ухудшение характеристик СБ с течением времени происходит практически равномерно и составляет 25% за пять лет. Ёмкость АБ длительное время остаётся неизменной, а после выработки порядка 80% ресурса (циклов заряд-разряд) начинает быстро деградировать [3], и на пятом году эксплуатации АБ потеряет около 36% мощности.

По данным математического моделирования [4] энергодвигательной системы КА в начале эксплуатации КА на борту имеется резерв мощности СЭП. Критическая продолжительность включения КДУ на витке (резерв мощности СЭП отсутствует, но энергобаланс КА является положительным) изменяется от 60 мин в начале эксплуатации КА до 27 мин к концу пятого года САС.

Рационально использовать избыток электроэнергии на борту КА во время первых трёх лет эксплуатации, применив КДУ с регулируемой тягой. Возможна работа двигателя СПД-50 в режиме: мощность разряда – 350 Вт, тяга – 20 мН [5]. Применение на малом КА КДУ с двумя режимами по тяге даст возможность использовать избыток электроэнергии для проведения коррекций с повышенной тягой, что позволит сократить время ввода КА в эксплуатацию. Также пропорционально уменьшится расход рабочего тела.

Математическое моделирование работы КДУ в режиме повышенной тяги показало, что в начале срока активного существования критическое время работы КДУ на витке (при орбитальной ориентации КА) составит 43 мин. При этом вырабатывается импульс тяги 51,6 Н·с, что существенно больше одного импульса штатного 40-минутного включения – 33,0 Н·с. При коррекциях наклона преимущество КДУ с регулируемой тягой становится ещё более очевидным: за два включения КДУ с тягой 2,04 Гс продолжительностью 960 с будет выработан импульс 38,4 Н·с против 26,3 Н·с (при номинальном значении тяги). Это позволяет сократить время коррекций в 1,24 раза, что при коррекции ошибок выведения КА «Канопус-В» составит порядка 60 – 65 витков коррекции и 220 г ксенона. Отметим, что даже при коррекциях наклона в режиме повышенной тяги, сохраняется резерв электрической мощности в 63,9 Вт·ч. Указанный резерв остаётся положительным в течение четырёх лет эксплуа-

тации КА, что позволяет рекомендовать режим повышенной тяги в качестве штатного при коррекциях наклона. Такой вариант работы КДУ позволит сократить продолжительность коррекций по наклону на 82 витка и дополнительно сэкономить 270 г ксенона. Суммарная экономия составит порядка 150 витков коррекций по наклону и 0,5 кг ксенона (10% от имеющегося на борту).

Применение режима повышенной тяги в режиме орбитальной ориентации после завершения первого года эксплуатации КА для выдачи импульсов коррекции по периоду затруднен в силу деградации СБ. Так уже после первого года эксплуатации критическое время работы на витке составит 38 мин, что меньше заданного, однако вырабатываемый за одно включение импульс тяги всё равно превысит номинальный в 1,52 раза. Работа в таком режиме предпочтительней, так как с ростом мощности разряда растёт КПД стационарного плазменного двигателя, и снижается расход рабочего тела.

Однако следует отметить, что с увеличением разрядного напряжения расходимость струи двигателя уменьшается до определённого (критического) уровня, а затем увеличивается, что влияет на износ элементов двигателя, следовательно, снижается его ресурс [6]. В виду того, что использовать по целевому назначению КДУ с повышенной тягой предполагается в течение первого года, то вполне допустимо сохранение элементов двигателей в работоспособном состоянии в течение оставшегося САС.

Результаты предварительного теплового расчёта показали, что температура элементов двигателей

при рабочем напряжении 280 В находится в допустимых пределах диапазонов, кроме монтажного провода МС 26-15, температура которого превышает допустимое по техническим условиям значение на 20°C.

Регулирование тяги накладывает некоторые особенности на работу системы преобразования и управления (СПУ), которая формирует требуемые режимы электропитания, в том числе напряжение разряда  $U_p$  и расход рабочего тела  $\dot{m}$ . Для увеличения КПД СПУ необходимо источник питания разряда, формирующий  $U_p$ , делать нерегулируемым, т. е. напряжение разряда должно изменяться пропорционально выходному напряжению СЭП, при этом ток разряда, определяемый расходом  $\dot{m}$ , должен быть постоянным. Выходная мощность источника питания разряда будет изменяться пропорционально напряжению разряда (т. е. напряжению СБ), что может привести к незначительному увеличению массы преобразователя, однако за счёт снижения потерь уменьшится масса теплоотвода, поэтому суммарная масса СПУ существенно не изменится. Такой режим целесообразно использовать при повышенной тяге в первые годы эксплуатации КА. В режиме пониженной тяги рациональнее использовать классический способ электропитания СПД стабилизированным напряжением и током разряда. В табл. 2 показаны расчётные энергетические характеристики СПУ различных типов двигателей в режимах повышенной и пониженной тяги (выходная мощность  $P_{\text{вых}}$ , потери  $P_{\text{пот}}$  и КПД разрядного преобразователя).

Таблица 2

| Характеристики        | СПД-50            |                   | СПД-70            |                   | СПД-100           |                   |
|-----------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                       | Повышенная<br>$F$ | Пониженная<br>$F$ | Повышенная<br>$F$ | Пониженная<br>$F$ | Повышенная<br>$F$ | Пониженная<br>$F$ |
| $P_{\text{вых}}$ , Вт | 204 – 351         | 216 – 247         | 580 – 792         | 613 – 693         | 1201 – 1638       | 1268 – 1433       |
| $P_{\text{пот}}$ , Вт | 22 – 39           | 29 – 34           | 50 – 69           | 68 – 77           | 83 – 114          | 125 – 142         |
| КПД, %                | 90                | 88                | 92                | 90                | 93,5              | 91                |
| Масса, кг             | 6,23              |                   | 11                |                   | 17                |                   |

\* Потери в разрядном преобразователе без учёта потерь в источниках питания клапанов, нагревателей и термодросселя.

\*\* Расчётная масса СПУ для управления двумя СПД, клапанами, нагревателями БХК и МГР и пироклапанами без коммутации шины питания; СПД-50 содержит один полукомплект (катод, поджигающий электрод и термодроссель).

При расчёте энергетических характеристик (см. табл. 2) предполагалось, что изменение тяги подчиняется зависимости:

$$\Delta F = \sqrt{\Delta U_p}.$$

Если закон регулирования иной, то разрядный преобразователь СПУ необходимо делать регулируемым, что ухудшает его КПД (до значений «Пониж. F»), кроме того необходим дополнительный узел приёма и обработки команд, задающих алгоритм регулирования тяги.

Для практического использования КДУ с регулируемой тягой необходимы дополнительные испытания СПД с целью подтверждения их ресурса и тяги во всём диапазоне изменения напряжения разряда. Данная задача решается проведением огневых испытаний электрореактивной КДУ, что сопряжено с материальными затратами. Частично сократить их позволяет электродинамический имитатор тягового модуля (ЭДИТМ), имитирующий разрядную цепь СПД, в наземном испытательном комплексе вместо СПД (в части разрядного промежутка).

Возможности, заложенные в ЭДИТМ, позволяют проводить проверки в широком диапазоне уровней напряжения разряда, разрядного тока и различных значениях амплитуды его колебаний

### Литература

1. Горшков О. А. Холловские и ионные двигатели для космических аппаратов / О. А. Горшков, В. А. Муравлёв, А. А. Шагайда. – М. : Машиностроение, 2008. – С. 19 – 21.
2. Лесневский В. А. Двигательная установка коррекции малого КА «Канопус-В» и ее огневые испытания / В. А. Лесневский, Л. И. Махова, М. В. Михайлов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – Томск : Томский политехнический университет, 2011. – Т. 319 – № 4. – С. 144 – 147.
3. Mukund R. Patel Spacecraft power systems / R. Patel Mukund. – Florida : CRC Press, 2005. – 691 p. : ill.
4. Математическое моделирование энергодвигательной системы малого космического аппарата / В. П. Ходненко, А. В. Хромов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2011. – Т. 125. – № 6. – С. 17 – 24.
5. Потапенко М. Ю., Гопанчук В. В. Характеристические соотношения размеров и параметров гибридного плазменного двигателя. – ИЕРС-2011-042.
6. Bouchoule A. Dual-Mode Operation of Stationary Plasma Thrusters / A. Bouchoule, Kim V., Kozlov V. [at al.] // Journal of Propulsion and Power. – January – February, 2006 – Vol. 22. – No. 1. – Pp. 38 – 47.

Поступила в редакцию 28.12.2011

**Владимир Александрович Лесневский**, аспирант, инженер-конструктор,  
т. (4012) 55-69-60, e-mail: fakil@gazinter.net

**Максим Валентинович Михайлов**, канд. техн. наук, научн. сотрудник,  
т. (382) 256-05-55, e-mail: polus@online.tomsk.net

**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@vniiem.ru