

УДК 629.7.087 : 538.4 : 001.2

С.Н. КУЛАГИН

Днепропетровский национальный университет, Днепропетровск, Украина

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРОЦЕССЫ ИОНИЗАЦИИ В ХОЛЛОВСКОМ ДВИГАТЕЛЕ

Проведен анализ возможных способов снижения мощности холловского двигателя, а также экспериментально оценено влияние геометрии разрядной камеры и схемы включения двигателя на интегральные характеристики и процессы ионизации.

холловский двигатель, разрядная камера, ионизация, расход рабочего тела, ток разряда, напряжение разряда, анод

Введение

В связи с миниатюризацией электронных приборов существует тенденция уменьшения массы космических аппаратов, что стимулирует разработку соответствующих двигательных систем с малой потребляемой мощностью, в частности для микро-спутников с массой ~100 кг она не должна превышать ~100 Вт.

В качестве одного из вариантов можно рассматривать электрореактивную двигательную установку с использованием холловских двигателей (ХД), преимущества которых заключаются в их конструктивной простоте, легкости управления и высоких уровнях выходных характеристик.

1. Формулирование проблемы

Уменьшение мощности до 100 Вт и ниже приводит к быстрому снижению коэффициента полезного действия двигателя, поэтому поиск путей снижения мощности холловского двигателя до приемлемого уровня без существенного уменьшения коэффициента полезного действия является достаточно актуальной задачей.

2. Решение проблемы

Существует несколько основных способов снижения мощности ХД.

2.1. Уменьшение разрядного напряжения.

Уменьшение разрядного напряжения имеет ограничение, связанное с уменьшением удельного импульса, что приводит к увеличению массы рабочего тела (РТ). Нижний предел разрядного напряжения ограничен уровнями 120 – 140 В, так как при более низких напряжениях начинает быстро расти энергетическая цена тяги [1].

2.2. Использование импульсных режимов.

Использование импульсных режимов работы позволяет в широких пределах изменять уровень потребляемой мощности ХД за счет частотно- и широтно-импульсной модуляции тяги двигателя. Однако, как показано в работе [2], при переводе двигателя в квазистационарный режим работы возникают потери, приводящие к снижению эффективности преобразования подводимой энергии в тягу, главными из которых являются потери рабочего тела в паузах между импульсами и снижение средней скорости плазменного сгустка, вызываемое нестабильностью разрядного напряжения в течение импульса.

2.3. Изменение геометрии разрядной камеры.

Для эффективной ионизации рабочего тела величина плотности тока нейтральных атомов, определяющая ток разряда и, соответственно, мощность, должна быть не ниже некоторого оптимального значения. В токовых единицах плотность тока должна удовлетворять соотношению [1]:

$$j_a \geq \frac{e\dot{m}}{MS}, \quad (1)$$

где j_a – плотность тока нейтральных атомов;

e – заряд электрона;

M – масса атома РТ;

S – проходное сечение кольцевого зазора РК;

\dot{m} – массовый расход РТ.

Из (1) следует, что для расширения рабочего диапазона двигателя в сторону малых расходов при сохранении величины j_a необходимо уменьшать проходное сечение кольцевого зазора РК, определяемое из соотношения:

$$S = 2\pi\bar{r}h, \quad (2)$$

где h – ширина кольцевого зазора РК;

\bar{r} – средний радиус кольцевого зазора РК.

Из (2) следует, что уменьшить S можно, уменьшив \bar{r} или h . Величина \bar{r} для ХД малой мощности ограничена конструкцией магнитной системы и толщиной полюсных наконечников и для известных двигателей малой мощности близка к минимально возможной.

Таким образом, практически единственным способом уменьшения проходного сечения является уменьшение ширины кольцевого зазора h . Однако уменьшение h приводит к увеличению потерь энергии за счет попадания большего числа ускоренных ионов на стенки РК и, соответственно, к уменьшению КПД.

Естественным способом преодоления указанного недостатка является уменьшение продольной протяженности зоны ускорения (ЗУ) [1], которое, с одной стороны, увеличит значение продольной компоненты электрического поля, т.е. уменьшит влияние радиальных перепадов потенциала на конфигурацию эквипотенциалей, а с другой – снизит потери ионов на стенках. Сокращение продольной протяженности ЗУ достигается увеличением скорости нарастания радиальной компоненты магнитного поля.

Минимальная протяженность ЗУ получена в двигателе с анодным слоем. Использование полого анода с уменьшенной на переднем срезе шириной полости анода позволяет снизить скорость эрозии полюсных наконечников, а использование профилированного магнитного поля с увеличенным продольным градиентом, позволяет создать двигатель с минимальной глубиной РК, при этом значительная часть приложенной разности потенциалов ($\sim 0,5U_p$) сосредоточена вне ускорителя [3].

Такой способ организации рабочего процесса при его использовании в двигателе малой мощности имеет один существенный недостаток: быстрое расширение потока атомов за срезом приводит к необходимости увеличения расхода рабочего тела, что в свою очередь увеличивает ток разряда и соответственно мощность двигателя.

Таким образом, выбор оптимальной глубины РК, при которой сохраняется высокая вероятность ионизации при минимальной глубине РК, является актуальной задачей при проектировании ХД малой мощности.

2.4. Постановка задачи исследований. Задачей исследований являлась оценка целесообразности использования в холловском двигателе малой мощности полого анода с уменьшенной шириной полости при двух значениях глубины РК и различных схемах включения.

2.5. Результаты исследований. Конструктивная схема двигателя, использованного при проведении исследований, представлена на рис. 1. Она включает в себя газораспределитель 1, анод 2, центральный полюс 3, магнитопровод 4, катушку намагничивания 5, изоляторы 6, 7, трубку газоподвода 8, проводящие полюсные наконечники 9, 10. Функции магнитного экрана выполнял анод 2. Ширина полости анода b составляла 2,75 мм и обеспечивалась введением в анод металлических колец 11, 12. Наружный диаметр РК составлял 37 мм, внутренний (на переднем срезе) – 18 мм. Ширина полюсных наконечни-

ков – 4 мм. Расстояние от передних кромок анода до полюсных наконечников – 2,5 мм. Глубина L РК изменялась соответствующим перемещением колец 11, 12.

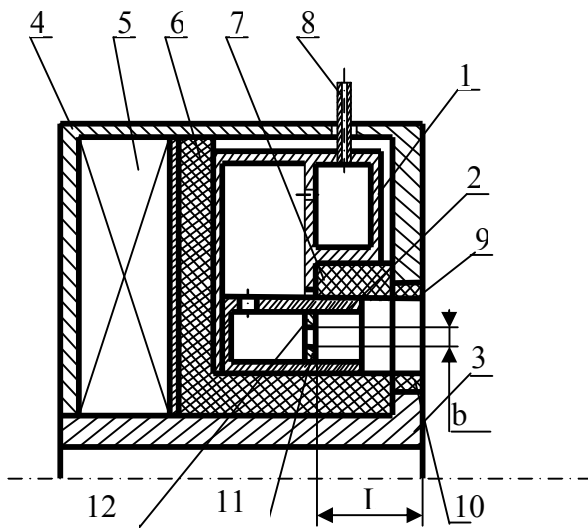


Рис. 1. Конструктивная схема Д-37Т

Для оценки эффективности ионизации использовалось отношение тока разряда к току ионов на коллектор из металлической сетки диаметром 110 мм, расположенной на расстоянии 120 мм от переднего среза двигателя. Полученные значения ионного тока сильно занижены из-за малых размеров коллектора, однако для качественной оценки и сравнения различных вариантов, их использование вполне приемлемо. Кроме того, для оценки эффективности ионизации измерялось минимальное напряжение горения разряда. Полученные характеристики при работе двигателя на аргоне и ксеноне в одноступенчатом варианте представлены в табл. 1 (без колец), 2, 3 (с кольцами при разных L), где \dot{m} – объемный расход РТ, U_p – напряжение разряда, I_p – ток разряда, I_k – ток катушки (подбирался по минимуму I_p при $U_p = 150$ В), I_i – ионный ток, P – тяга, C – энергетическая цена тяги (без учета мощности катушки намагничивания), $U_{p\min}$ – минимальное напряжение горения разряда.

Таблица 1

Характеристики ХД Д-37Т
(без колец при $L = 20$ мм)

\dot{m} , см ³ /с	U_p , В	I_p , А	I_k , А	I_p/I_i	P , гс	C , Вт/гс	$U_{p\min}$ В
Аргон							
0,23	150	0,78	1,2	5,2	0,46	254	95
0,21	150	0,46	1,2	5,1	0,28	246	140
0,17	150	0,35	0,5	11,6	0,094	558	150
0,23	200	0,82	1,2	5,0	–	–	–
0,23	180	0,80	1,2	5,2	–	–	–
0,23	130	0,65	1,2	5,4	–	–	–
0,23	100	0,42	1,2	6,0	–	–	–
Ксенон							
–	150	0,57	1,25	4,4	0,55	155	–
–	200	0,60	1,25	4,0	0,66	182	73

Таблица 2

Характеристики ХД Д-37Т
(с кольцами при $L = 1,05$ мм)

\dot{m} , см ³ /с	U_p , В	I_p , А	I_k , А	I_p/I_i	P , гс	C , Вт/гс	$U_{p\min}$ В
Аргон							
0,23	200	0,79	1,2	4,9	–	–	–
0,23	180	0,78	1,2	5,2	–	–	–
0,23	150	0,76	0,5	5,8	0,46	247	–
0,23	130	0,62	1,2	6,2	–	–	–
0,23	120	0,56	1,2	6,3	–	–	100
0,21	150	0,43	1,2	6,1	0,22	293	145
Ксенон							
–	150	0,65	1,25	4,3	0,62	157	–
–	200	0,70	1,25	4,1	0,80	175	65

Таблица 3

Характеристики ХД Д-37Т
(с кольцами при $L = 6,5$ мм)

\dot{m} , см ³ /с	U_p , В	I_p , А	I_k , А	I_p/I_i	P , гс	C , Вт/гс	$U_{p\min}$ В
Аргон							
0,23	150	0,66	1,2	6,0	0,38	260	130
Ксенон							
–	150	0,46	1,25	4,6	0,36	191	120

Во второй серии экспериментов измерялись характеристики двигателя при включении по двухступенчатой схеме при различных расходах ксенона. При этом дополнительный электрод, служивший анодом первой ступени, устанавливался внутри по-

лости анода на керамическом изоляторе. Полученные результаты представлены в табл. 4, где U_I, I_I, U_{II}, I_{II} – напряжения и токи первой (разрядной) и второй (ускорительной) ступеней соответственно.

Таблица 4

Характеристики ХД Д-37Т
(двухступенчатый вариант,
с кольцами, $L = 6,5$ мм)

$U_I,$ В	$I_I,$ А	$U_{II},$ В	$I_{II},$ А	I_{II}/I_i	$P,$ гс	$C,$ Вт/гс	$U_{p_{\min}}$ В
Аргон							
40	0,88	150	0,74	4,9	0,49	298	–
28	0,25	150	0,69	5,8	0,38	290	110
Ксенон							
40	0,5	150	0,48	4,0	0,5	184	50
48	1,0	150	0,6	5,0	–	–	–
40	0,5	150	0,4	5,0	–	–	–
40	0,3	150	0,29	4,8	0,27	205	–

Из представленных результатов видно, что введение в анод колец 11, 12 при работе на аргоне приводит к увеличению $U_{p_{\min}}$ и I_p/I_i , при этом на пониженном расходе $\dot{m} = 0,17$ см³/с разряд не горит.

Уменьшение L с 10,5 мм до 6,5 мм приводит к дальнейшему росту $U_{p_{\min}}, I_p/I_i$ и цены тяги C , что свидетельствует о снижении вероятности ионизации. Ситуация значительно улучшается при использовании двухступенчатой схемы. При этом во второй (ускорительной) ступени ток разряда увеличивается, $U_{p_{\min}}$ и I_p/I_i уменьшаются, кроме того, возможна реализация режимов работы с относительно низкой ценой тяги.

Заключение

Полученные результаты являются предварительными и требуют уточнения, однако, на качествен-

ном уровне можно говорить о возможности значительного уменьшения глубины разрядной камеры холловских двигателей малой мощности. При этом некоторое ухудшение характеристик может в некоторых случаях оказаться оправданным ввиду увеличения ресурса. Показано, что использование двухступенчатой схемы включения может заметно улучшить интегральные характеристики двигателя и расширить рабочий диапазон в сторону уменьшения расходов рабочего тела и соответственно потребляемой мощности.

Дальнейшие исследования двигателя могут быть направлены на уточнение оптимальной глубины разрядной камеры и параметров разряда в первой ступени, при которых достигается высокая эффективность работы двигателя.

Литература

1. Стационарные плазменные двигатели / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский и др. – Х., 1989. – 316 с.
2. Кирюшко В.И. Экспериментальное исследование УЗДП, работающего в квазистационарном режиме // Источники и ускорители плазмы. – Х. – 1978. – Вып. 3. – С. 28 – 30.
3. Совершенствование конструкции одноступенчатого ускорителя с анодным слоем (УАС) / В.И. Гаркуша, Е.А. Ляпин, К.К. Михайлов и др. // Тезисы докладов шестой Всесоюзной конференции "Плазменные ускорители и ионные инжекторы". Днепропетровск, 16-18 сентября 1986 г. – 1986. – С. 11 – 12.

Поступила в редакцию 27.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Н.В. Белан, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е.Жуковского «ХАИ», Харьков.