

ХОЛЛОВСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

С.Н. Кулагин, И.Н. Стаценко, канд. техн. наук, Л.Г. Дубовик, Л.Б. Кабакова

Днепропетровский национальный университет,

Ю.В. Манец, Государственное конструкторское бюро "Южное", г. Днепропетровск, Украина

Общая постановка проблемы и её связь с научно-практическими задачами. В связи с тенденцией уменьшения массы полезной нагрузки космических аппаратов (КА) за счет миниатюризации электронных приборов становится актуальным применение КА малой массы (до 500 кг) с доступными мощностями, не превышающими нескольких сотен ватт.

Преимущества холловских двигателей (ХД) для таких КА состоят в их конструктивной простоте, легкости управления, высоких уровнях выходных характеристик.

Обзор публикаций и анализ нерешённых проблем. Основываясь на имеющемся опыте разработки ХД [1], можно рассматривать два пути достижения малой мощности двигателя:

- снижение разрядного напряжения;
- снижение разрядного тока и соответственно расхода рабочего вещества через анод двигателя.

Оба эти направления имеют естественные ограничения. Основными из этих ограничений являются следующие факторы:

- уменьшение площади сечения разрядной камеры (РК) двигателя для обеспечения высокой степени ионизации при малых расходах рабочего вещества влечет за собой нарушение оптимальной геометрии элементов магнитной системы и профиля магнитного поля, что приводит к нарушению фокусировки и потере эффективности;

- с уменьшением размеров увеличивается доля потерь энергии на элементах конструкции.

В конструкции двигателя малого размера затруднено применение известных технических решений, обеспечивающих минимальную эрозию стенок разрядной камеры и максимальный ресурс работы холловских двигателей. Так, для обеспечения нарастаю-

щего от анода к срезу РК магнитного поля желательно использование центральной катушки и магнитного экрана. Однако при малых размерах двигателя места для размещения катушки остается очень мало либо не остается совсем, а магнитный экран может слишком сильно шунтировать магнитное поле, что потребует неоправданно больших энергозатрат для питания катушек.

Цель исследований. Целью исследований являлась оценка целесообразности использования в холловском двигателе малой мощности (ХДММ) магнитного экрана для повышения его рабочего ресурса при сохранении приемлемых тягово-энергетических характеристик. При этом рассматривалось несколько вариантов конструкции двигателя с оценкой влияния различных факторов на интегральные характеристики.

Результаты исследований. Конструктивная схема двигателя разрабатывалась с учетом основных требований к ХД:

- азимутальная однородность подачи рабочего тела;
- нарастающее от анода к срезу РК магнитное поле [2];
- соблюдение оптимальных соотношений размеров элементов РК.

В работе [3] предложена новая концепция ХД с разделением проводящего канала на несколько секций, что позволило увеличить КПД. В соответствии с этим в конструкции использованы проводящие полюсные наконечники, работающие как одна из секций проводящего канала.

Схема двигателя (рис. 1) включала в себя анод 1 и керамическую РК 2. Магнитная система состояла из центральной и четырех наружных катушек, магнитопроводов, полюсов и полюсных наконечников (на-

ружного 3 и внутреннего 4) из стали 12Х18Н10Т, защищающих полюсы от распыления.. Центральная катушка размещалась позади разрядной камеры, что исключало ее перегрев.

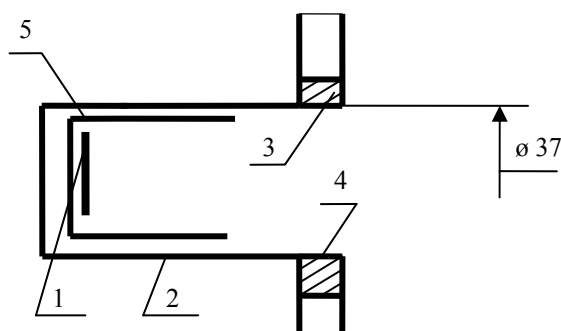


Рис. 1. Конструктивная схема Д-37

В первом варианте в конструкции отсутствовал магнитный экран 5, толщина полюсных наконечников равнялась 1 мм. Во втором варианте для увеличения ресурса толщина наружного полюсного наконечника увеличена до 3 мм, а внутреннего - до 5 мм. Следует отметить, что толщина 5 мм является предельной для данных размеров РК, так как при этом центральный полюс отсутствует и полюсный наконечник становится по существу наконечником центрального магнитопровода. В третьем варианте конструкция была дополнена магнитным экраном 5, что позволило уменьшить магнитную индукцию в зоне расположения анода. Магнитный экран был изолирован от анода. По существу, такая схема представляет собой двухступенчатый ускоритель, в котором функции катода первой ступени может выполнять магнитный экран. В четвертом варианте анод 1 отсутствовал, а его функции выполнял магнитный экран. Такая схема с полым анодом и проводящими полюсными наконечниками отличается от схемы двигателя с анодным слоем только наличием в разрядной камере диэлектрических элементов.

Исследования характеристик проводились при работе двигателя на ксеноне в вакуумной камере объемом 5 м³, оснащенной паромасляными насосами, при динамическом давлении не выше 2·10⁻⁴ мм рт. ст. (по воздуху). Для измерения тяги использовался прибор

ИТ-05 с погрешностью 2 % разработки Днепропетровского национального университета.

В качестве основного критерия оценки эффективности работы двигателя была выбрана энергетическая цена тяги ввиду того, что потребляемая мощность является основным ограничивающим фактором при разработке двигателей для КА малой массы.

Значения цены тяги для различных вариантов, полученные при фиксированном напряжении 120 В и расходе 0,57 мг/с, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Цена тяги ХДММ Д-37

Вариант	1	2	3	4
С, Вт/мН	14,4	20,0	15,2	15,3

Из представленных результатов видно, что для данной геометрии разрядной камеры первый вариант, являясь конструктивно наиболее простым, дает возможность получить приемлемое значение цены тяги при относительно небольшом ресурсе. Во втором варианте магнитное поле оказывается размытым вдоль разрядной камеры (рис. 2), при этом увеличивается наклон магнитных силовых линий к оси двигателя и, соответственно, потери ионов на стенках из-за плохой фокусировки, что приводит к значительному увеличению цены тяги (~40 %). третий вариант позволяет получить минимальную цену тяги, поскольку анод располагается в зоне слабого магнитного поля (рис. 2), а слой ионизации и ускорения смещается к выходному срезу РК. Следует отметить, что попытки включения двигателя по двухступенчатой схеме приводили к увеличению цены тяги на всех исследованных режимах, поэтому такой вариант включения подробно не исследовался. Минимальная цена тяги имела место при включении по одноступенчатой схеме, при этом плавающий потенциал магнитного экрана составлял 90 В при разрядном напряжении 120 В. Дальнейшие исследования показали, что магнитный экран может быть использован в качестве полого анода, что упрощает конструктивную схему (четвертый вариант), при этом цена тяги возрастает незначительно.

Таблица 2

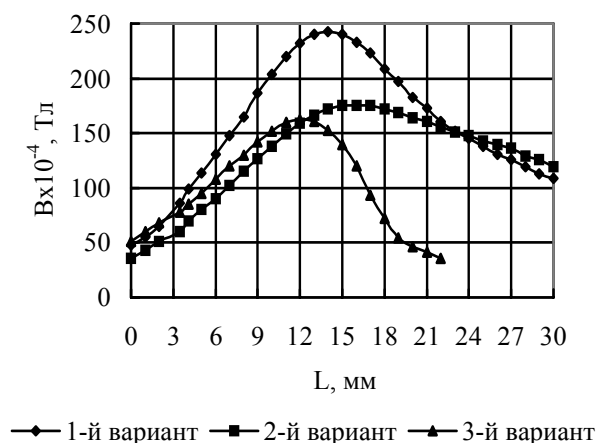


Рис. 2. Распределение магнитного поля

Для оценки эффективности применения магнитного экрана можно воспользоваться следующими соображениями.

Из рис. 2 видно, что при прочих равных условиях магнитный экран, замыкая на себя часть магнитных силовых линий, уменьшает максимальную напряженность магнитного поля $\sim$ на $1/3$. Для ее восстановления до оптимального уровня приходится увеличивать мощность, потребляемую катушками. Однако при разумном выборе размеров элементов магнитной системы это увеличение может быть относительно небольшим. Так, для данной конструкции оно составляет 2 Вт (3,5 Вт для первого варианта, 5,5 Вт – для четвертого варианта). При разрядной мощности $\sim$ 65 Вт такое небольшое увеличение потребляемой мощности выглядит несущественным и вполне оправдано, если учитывать, что ресурс при этом увеличивается в несколько раз.

Таким образом, оптимальным является четвертый вариант конструкции двигателя, характеристики которого приведены в табл. 2.

Перспективы дальнейших исследований. Дальнейшие исследования двигателя могут быть направлены на определение минимальных размеров разрядной камеры с магнитным экраном, при которых эффективность двигателя остается приемлемой с точки зрения цены тяги и ресурса.

Характеристики ХДММ Д-37

m, мг/с	U, В	I, А	P, мН	C, Вт/мН	N, Вт	J, с	КПД, %
0,46	120	0,5	2,4	25	60	522	10,4
0,46	150	0,5	3,0	25	75	652	13,0
0,46	180	0,51	3,5	26,2	92	761	14,5
0,46	220	0,51	4,2	26,7	112	913	17,0
0,46	300	0,49	5,5	26,7	147	1196	22,4
0,57	80	0,62	2,6	17,7	50	491	13,8
0,57	100	0,58	3,5	16,6	58	614	18,5
0,57	120	0,6	4,7	15,3	72	825	26,9
0,57	150	0,6	5,4	16,7	90	947	28,4
0,57	180	0,61	6,0	18,3	110	1053	28,7
0,83	120	0,95	7,5	15,2	114	904	29,7
0,83	150	0,97	9,0	16,2	145	1084	33,5
1,03	120	1,2	10,0	14,4	144	971	33,7
1,03	150	1,23	11,8	15,6	184	1146	36,6

Выводы. Полученные результаты показывают, что простое увеличение толщины полюсных наконечников для повышения ресурса работы ХДММ неэффективно, так как приводит к значительному снижению тягово-энергетических характеристик. Дополнение конструкции магнитным экраном исключает этот недостаток.

Литература

- Захаренков Л.Э., Числов Г.О., Семенкин А.В. Исследование характеристик двигателя с анодным слоем малой мощности // Двигатели и энергоустановки для ракетной техники: Сб. науч. тр.- Харьков: ХАИ.- 2002.- С. 104-108.
- Есипчук Ю.В., Морозов А.М. Ускоритель с замкнутым дрейфом электронов (УЗДП) с большим продольным градиентом магнитного поля // Материалы II-й Всесоюз. конф. по плазменным ускорителям.- Минск: Наука и техника.- 1973.- С. 20-21.
- Zhakupov A., Khartov S., Latyshev L. Hall thruster with a sectioned conduction channel // 3-th International Conference Propulsion.- Cannes.- 2000.- ESA SP-465.- (December 2000).- P. 827-828.

Поступила в редакцию 15.05.03

Рецензенты: канд. техн. наук, ст. науч. сотр. А.П. Толстомят, ДНУ, г. Днепропетровск; канд. техн. наук, Генеральный директор Ю.К. Гонтарев, "Эко-теп", г. Днепропетровск.