



УДК 629.7.036.74

В. В. Гопанчук, О. А. Митрофанова, М. Ю. Потапенко**ИССЛЕДОВАНИЕ КОНФИГУРАЦИИ СЕРДЕЧНИКА ИСТОЧНИКА
НАМАГНИЧИВАНИЯ МАГНИТНЫХ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Представлены результаты исследований влияния различных форм сердечников наружных источников намагничивающей силы магнитных систем электроракетных двигателей на азимутальную равномерность распределения магнитного поля в рабочем межполюсном промежутке.

Results of researches of influence of various forms of cores of external sources of magnetising force of magnetic systems of electric propulsion on azimuthal evenness of magnetic field distribution in an operating interpole interval are presented.

155

Ключевые слова: холловский электрореактивный двигатель, гибридный плазменный двигатель, магнитная система, катушка намагничивания.

Key words: Hall effect thruster, stationary plasma thruster, hybrid plasma thruster, magnetic system, magnetic coil.

Совершенствование электроракетных двигателей (ЭРД) неразрывно связано с тенденциями развития современных и перспективных космических аппаратов (КА), необходимостью увеличения сроков активного существования, в связи с чем также ужесточаются требования и к ЭРД по эффективности, надежности и совместимости с аппаратурой КА. Данные тенденции предполагают разработку более эффективных ЭРД.

Одним из направлений совершенствования холловских ЭРД является создание высокоимпульсных двигателей, разработка которых связана с переходом на режимы функционирования свыше 500 В при одновременном усилении магнитного поля в ускорительном канале (УК) свыше 150 Гс.

Целью нашей работы стало исследование влияния различных форм сердечника наружных источников намагничивающей силы, используемых в составе магнитных систем (МС) ЭРД, на азимутальную равномерность распределения магнитного поля в межполюсном рабочем промежутке с целью повышения эффективности МС ЭРД.

Холловские ЭРД содержат разнообразные МС, предназначенные для создания в УК магнитного поля заданной структуры распределения для организации устойчивого ионообразования и ускорения плазмы. При разработке МС необходимо обеспечить структуру нарастающего магнитного поля от анода к выходу УК, а также его азимутальную однородность, что достижимо за счет повышения эффективности МС путем совершенствования ее магнитного контура, формируемого отдельными элементами конструкции.



Рис. 1. Стационарный плазменный двигатель М-50 с круглой МС с одной общей наружной катушкой

Дополнительными возможностями по теплосбросу обладают открытые МС, в которых излучение избыточного тепла в окружающее пространство происходит через проемы между наружными катушками.

В стационарных плазменных двигателях (СПД) повышенной мощности применяются МС с наружными катушками цилиндрической формы, в которых их магнитный контур образован за счет соединений между собой силового магнитопровода (1), сердечника (2) внутренней катушки, внутреннего (3) и наружного (4) магнитных полюсов и сердечников (5) наружных катушек (рис. 2).

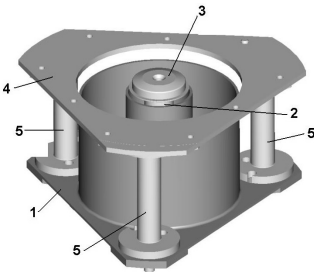


Рис. 2. Магнитный контур СПД-50 с МС с тремя наружными катушками цилиндрической формы

За последний период при разработке гибридных двигателей предпринята попытка создания более эффективной МС (рис. 3), сочетающей в себе обеспечение высокой азимутальной однородности структуры магнитного поля при низкой теплонапряженности конструкции и повышенной механической прочности за счет применения в такой МС наружных катушек плоской формы, которые по периферии магнитного контура из-за своего большого размера размещаются тангенциально относительно межполюсного промежутка [1].

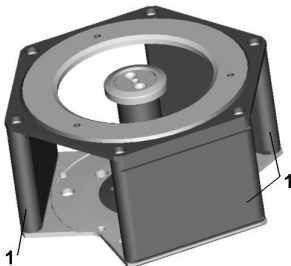


Рис. 3. Магнитный контур ПлаС-40 с МС с тремя наружными катушками плоской формы

Для проведения сравнительного анализа различных конфигураций МС ее конструктивную схему удобно



представить в поперечном плане (рис. 4). На рисунке обозначены основные элементы МС и основные геометрические размеры, характеризующие расположение наружных катушек намагничивания. Для наглядности азимутальная топология магнитного поля и тепловой поток Q , исходящий от разрядной камеры и проходящий через проемы длиной L_Q между наружными катушками, на рисунке показаны условно.

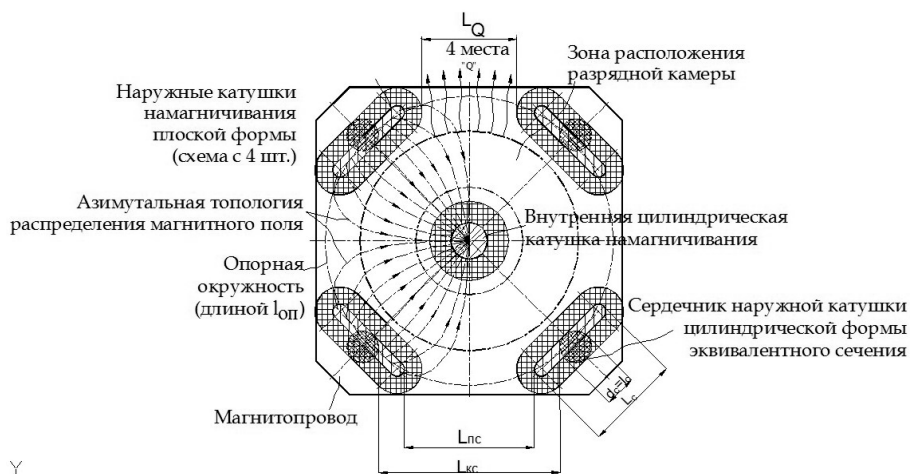


Рис. 4. Схема МС с четырьмя наружными катушками плоской формы

Предложенная МС предполагает комбинационное решение задач по повышению азимутальной однородности магнитного поля в УК в сочетании со снижением теплонапряженности конструкции двигателя и повышению механической стойкости его МС. В электромагнитной технике внешняя часть магнитного контура круглых МС «броневое» типа, часто называемая ярмом 1, выполняется в форме цилиндра, который, являясь магнитным проводником по периферии, обеспечивает его прохождение с высокой азимутальной равномерностью распределения магнитного потока.

Такая МС обладает максимальным коэффициентом заполнения магнитопроводящим материалом периферийного участка магнитного контура, который, соответственно, будет определяться соотношением

$$K_p = \frac{l_c}{l_{on}} = 1, \quad (1)$$

где l_c — длина дуги, занимаемой магнитным проводником с диаметром d_c ; l_{on} — длина опорной окружности, эквивалентной диаметру сплошного ярма.

В таких МС в большинстве случаев к поверхности ярма примыкает обмотка одной общей катушки наружного источника намагничивания. При таком варианте МС, применяемых в СПД, ярмо вместе с одной наружной катушкой полностью охватывают основной источник тепловы-



деления — его разрядную камеру, ограничивая теплосброс излучением с ее внешних поверхностей.

Для снижения теплонапряженности конструкции МС сплошное ярмо с одной наружной катушкой может быть заменено на несколько отдельных катушек, которые представляют собой сердечник в виде стержня цилиндрической формы d_c , на котором размещаются витки обмотки катушки. Такая группа наружных источников намагничивающей силы равномерно размещается по азимуту, при этом параметр K_p будет 0,11, что свидетельствует о низком распределении магнито-проводящего материала по периферии МС. Кроме того, механическая стойкость такой конструкции МС недостаточно прочная, так как она базируется на нескольких цилиндрических стержнях относительно малых диаметров и обеспечивается в основном за счет взаимного удаления друг от друга группы элементов L_{kc} , что также оказывает влияние на эффективность распределения магнитного потока в соединении между сердечником и наружным полюсом (или с другой стороны с магнитопроводом).

МС с плоскими наружными катушками, образующими между собой значительно меньшие проемы L_{nc} , позволяет достигнуть значений K_p от 0,30 до 0,57, что, как видно, очень близко к значению коэффициента идеальной сплошной цилиндрической формы ярма круглых МС. Кроме того, механическая устойчивость такой МС будет выше из-за более протяженной опорной базы каждого сердечника из всей группы наружных источников намагничивающей силы и выполняющих функции ребер жесткости всей МС.

Расчеты магнитных полей выполнялись путем трехмерного моделирования образцов сердечников на программе NISA/EMAG. По результатам расчетов проведен анализ основных параметров и характеристик наружных катушек намагничивания, сердечники которых имеют цилиндрическую или плоскую формы.

Исходные данные для магнитных расчетов следующие:

- исследуемые образцы выполнены из одного материала с одинаковыми магнитными свойствами, задаваемыми зависимостью $B = f(H)$;
- образцы выполнены одинаковой высоты 20 мм и равными площадями поперечных сечений, соответствующих площади сердечника $\varnothing 12$ мм;
- действующая намагничивающая сила, генерирующая магнитный поток, принята равной 400 А для достижения контрастного распределения магнитной индукции в достаточно широком диапазоне;
- контрольная плоскость сканирования достигаемой топологии магнитных потоков отстоит от торцевых поверхностей образцов на 2,5 мм (исходя из типичных размеров примыкающих к ним магнитопровода и наружного магнитного полюса толщиной от 2 до 5 мм).

По результатам магнитных расчетов получено распределение магнитной индукции в рассматриваемых образцах сердечников цилиндрической и плоской форм (рис. 5).

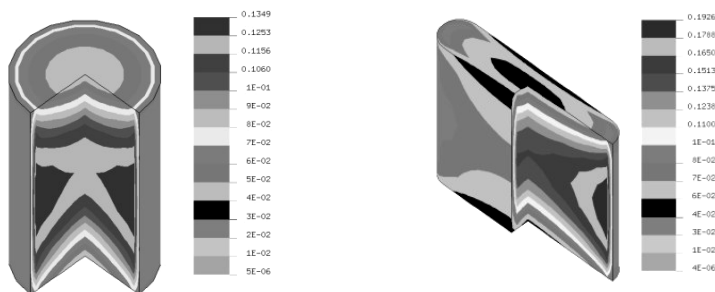


Рис. 5. Трехмерное распределение магнитной индукции в образцах сердечников различной формы

159

Для цилиндрического образца распределение магнитной индукции в поперечном сечении, как и следовало ожидать, является строго концентрическим с увеличением магнитной индукции в радиальном направлении от центра к внешней цилиндрической поверхности сердечника. При такой цилиндрической форме генерируемый магнитный поток представляет собой форму пучка.

Для плоского образца сердечника распределение магнитной индукции трансформировалось так, что в сердцевине его центральной части проявилась область пониженных значений, тогда как по его краям сосредоточены области более высокой магнитной индукции при сохранении характерного увеличения магнитной индукции в направлении из центра к внешним поверхностям сердечника. Таким образом, становится возможным обеспечение генерируемого магнитного потока растянутой лентообразной формы.

Рассмотрим характер распределения магнитной индукции по высоте исследуемых образцов (рис. 6).



Рис. 6. Распределение магнитной индукции по высоте в образцах сердечников различной формы

Как видно на рисунке 6, в цилиндрическом образце в серединной части сердечника сосредоточена область максимальных магнитных полей, которая при этом полностью перекрывает в поперечном направлении (по радиусу) сечение проводника. Понятно, что при необходимости увеличения магнитного потока эффект насыщения в первую очередь произойдет в данной критичной области, которая с точки зрения магнитной проводимости потока будет ограничением.



В плоском же образце аналогичная область максимальных значений магнитной индукции разделена на две, которые разведены по ширине и сосредоточены преимущественно вдоль краевых участков серединной части сердечника. Очевидно, что в случае необходимости увеличения магнитного потока в плоском сердечнике эффект насыщения вначале будет происходить только вблизи краев, что с точки зрения магнитной проводимости уже не будет столь критичным, так как центральная часть сможет обеспечивать прохождение приращения магнитного потока. Таким образом, плоская форма сердечника более предпочтительна, так как обладает дополнительными возможностями магнитной проводимости.

Анализ распределений показывает, что над торцевыми поверхностями разница магнитной индукции, действующих в сердцевине (точка А) и на краевых участках сердечников (точка Б), для плоского элемента меньше в 1,5 раза, чем в цилиндрическом образце, что с точки зрения обеспечения равномерности магнитных потоков со сторон входа и выхода более предпочтительно.

На рисунке 7 показаны распределения магнитной индукции над торцами на расстоянии 2,5 мм.

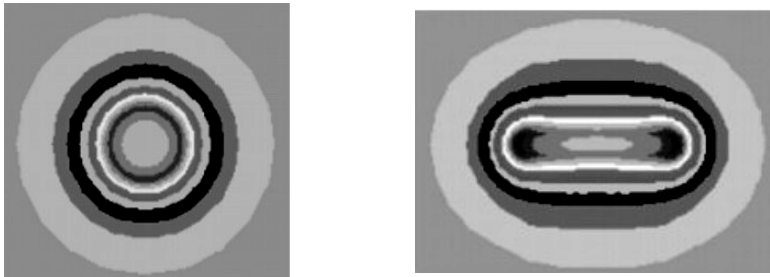


Рис. 7. Поперечная топология распределения магнитных индукций над торцами сердечников различной формы на расстоянии 2,5 мм

Как видно, если для цилиндрического образца распределение магнитного поля представляется строго концентрическим, то для плоского образца характерна трансформированная форма, соответствующая заданной форме сердечника. При этом также наблюдается наличие двух зон повышенных значений магнитной индукции, сосредоточенных по краям сердечника. Однако в конструкции МС зоны с повышенной индукцией сориентированы таким образом, что они являются близлежащими относительно пролетов между катушками, а потому часть необходимого магнитного потока, распределяющегося в азимутальных направлениях на пролетных участках наружного магнитного полюса, будет отбираться преимущественно из данных зон, в итоге способствуя выравниванию магнитного поля по азимуту в межполюсном промежутке.

На рисунке 8 представлена векторная топология распределения магнитной индукции, которая также свидетельствует о положительных тенденциях трансформации формы самого магнитного потока, обла-



дающего большей равномерностью по ширине сердечника на более протяженном участке.

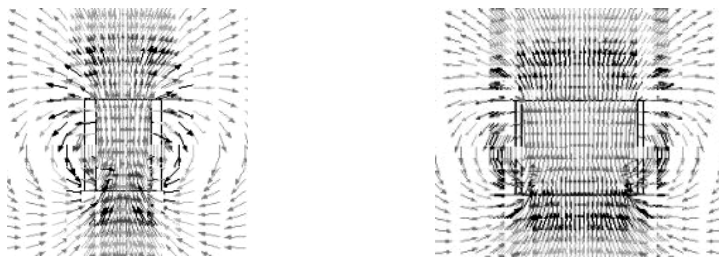


Рис. 8. Векторная топология распределения магнитной индукции по высоте в образцах сердечников различной формы

161

По результатам проведенных работ сделаем вывод о возможности повышения азимутальной однородности магнитного поля и обеспечения действующей в УК двигателя расчетной конфигурации магнитной линзы на гарантированно большем участке по азимуту при помощи МС с наружными катушками намагничивания плоской формы.

Такая МС, содержащая три наружные катушки намагничивания плоской формы, была апробирована в составе прототипа ПлаС-40, внешний вид которого представлен на рисунке 9. Ресурсные испытания прототипа ПлаС-40 проводились на различной мощности и включали наработку по 100 ч на каждом из двух режимов: первый этап – при мощности 200 Вт (при $U_p = 200$ В и $I_p = 1,0$ А), а второй – при мощности 400 Вт ($U_p = 280$ В и $I_p = 1,4$ А).

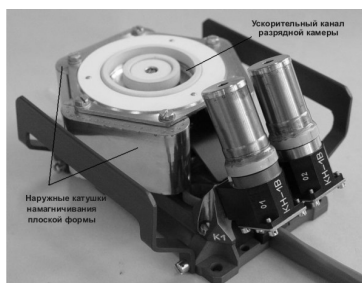


Рис. 9. Внешний вид прототипа ПлаС-40

На изготовленном образце были проведены также магнитные измерения по определению неравномерности распределения магнитного поля по глубине в УК (рис. 10). По результатам магнитных измерений азимутальная неоднородность распределения магнитной индукции в рабочем межполюсном промежутке МС на уровне с координатой $X = 61$ мм (вдоль оси модели), соответствующая уровню расчетного положения V_{max} , при различных токах запитывания последовательно соединенных катушек намагничивания не превышает 4%, что ниже допустимой нормы по азимутальной неравномерности (не более 8%).

Как видно из графиков, изменения магнитной индукции в канале не связаны с расположением катушек намагничивания или промежутков между ними, а обусловлены классом точности изготовления элементов МС, что свидетельствует о качественном повышении азимутальной равномерности магнитного поля и приближении ее к равномерности, достигаемой в круглых МС.

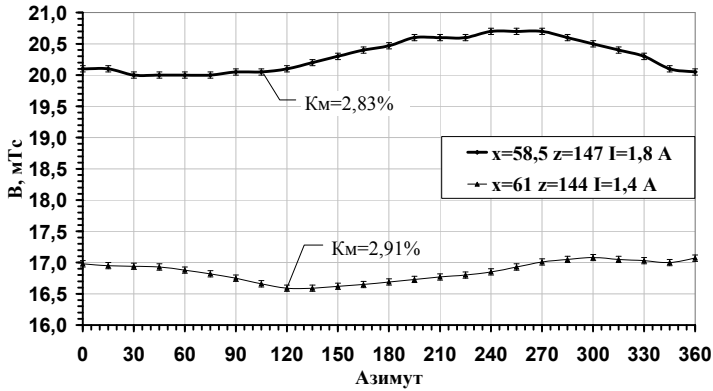


Рис. 10. Результаты измерений азимутальной неравномерности магнитной индукции в УК прототипа ПлаС-40 при различных токах в катушках намагничивания

В результате исследовательских работ определена возможность снижения азимутальной неоднородности магнитного поля в межполюсном промежутке до 3 % путем применения катушек намагничивания с сердечником плоской формы, каждая из которых замещает две цилиндрические катушки, при снижении суммарной массы используемых сердечников в МС на 50 %. Кроме того, данное техническое решение позволяет повысить надежность за счет минимизации количества применяемых деталей и узлов и упрощения электрической схемы МС, а также сокращения количества соединений электрических проводов между катушками намагничивания.

Список литературы

1. Гопанчук В. В. Плазменный двигатель с замкнутым дрейфом электронов: пат. РФ №2204053; кл. F03H 1/00; 29.09.00.

Об авторах

Владимир Васильевич Гопанчук – ведущий конструктор ФГУП ОКБ «Факел», Калининград, e-mail: speed@webo.name.

Ольга Александровна Митрофанова – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: speed@webo.name.

Мира Юрьевна Потапенко – асп., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, e-mail: mira-world@yandex.ru.

Authors

Vladimir Gopanchuk – Leader designer EDB Fakel, Kaliningrad, e-mail: speed@webo.name.

Olga Mitrofanova – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, e-mail: speed@webo.name.

Mira Potapenko – PhD student, I. Kant Baltic Federal University, e-mail: mira-world@yandex.ru.