

УДК 629.7.036.74

## **Исследование конфигурации сердечника источников намагничивания магнитных систем электрореактивных двигателей**

В.В. Гопанчук, О.А. Митрофанова, М.Ю. Потапенко

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

**Ключевые слова:** электрореактивный двигатель, гибридный плазменный двигатель, магнитная система, катушка намагничивания, форма сердечников катушек намагничивания.

### **Введение**

Как известно, различные электрореактивные двигатели (ЭРД) уже многие годы успешно используются в космосе и масштабы их применения расширяются. В связи с этим проводились и проводятся работы по совершенствованию конструкции и повышению эффективности их работы. Одним из направлений совершенствования ЭРД является разработка новых магнитных систем (МС), играющих определяющую роль в организации рабочих процессов в двигателе и переход к новым схемам разрядной камеры двигателя [1,2] МС должна создавать в ускорительном канале (УК) магнитное поле с определенным уровнем индукции и определенной топологией [3], при этом существенной является азимутальная равномерность распределений индукции магнитного поля по длине УК. Решение этих задач может быть осуществлено магнитными системами различной конструкции. Так, в созданных ранее и современных ЭРД, например, в стационарных плазменных двигателях (СПД) использовались и используются МС с двумя системами катушек намагничивания:

- с центральной и несколькими наружными катушками, намотанными на магнитопроводящих сердечниках (двигатели СПД-70, СПД-100 и др. разработки ОКБ «Факел» [4]);

- с одной центральной и одной наружной катушкой, размещенной под наружным магнитопроводом «броневого» типа (модуль М-50 и др. [4]).

Количество наружных катушек намагничивания и форма сердечников также могут быть разными. С учетом изложенного, целью данной статьи является рассмотрение влияния формы сердечников наружных катушек намагничивания на характеристики магнитного поля как в УК, так и полей рассеивания в периферийной области и, в частности на азимутальную равномерность распределения индукции магнитного поля.

## 1. Анализ элементов магнитной системы ЭРД

Как уже отмечалось выше, в известных ЭРД применяются разные конструктивные схемы МС, а именно: с одной общей наружной катушкой (рисунок 1) или с несколькими наружными катушками намагничивания, охватывающих снаружи более теплонапряженную разрядную камеру [5].

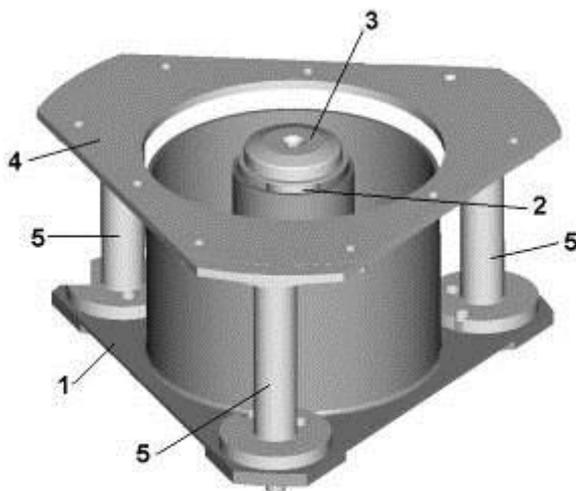


**Рисунок 1 - Стационарный плазменный двигатель М-50 с круглой МС с одной общей наружной катушкой**

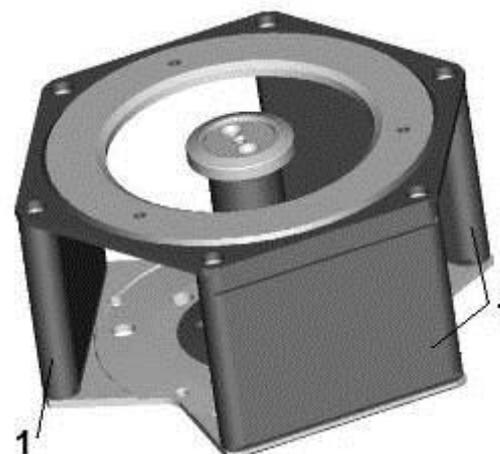
Любая конструкция МС должна обеспечивать надежное функционирование в условиях действия повышенных температур, что достигается организацией эффективного теплоотвода с наиболее теплонапряженных внутренних элементов конструкции за счет теплопроводности материалов конструкции. МС с наружными катушками цилиндрической формы (рисунок 2), в которых магнитный контур образован за счет соединений между собой силового магнитопровода (1), внутренней катушки с сердечником (2), внутреннего (3) и наружного (4) магнитных полюсов и наружных катушек с сердечниками (5) обладают определенными преимуществами

по теплосбросу, поскольку излучение избыточного тепла в окружающее пространство в этом случае происходит через проемы между наружными катушками.

Недостатком таких МС является заметная азимутальная неравномерность распределений магнитной индукции по длине УК. За последний период при разработке гибридных плазменных двигателей параметрического ряда типа ПлаС [5,6] предпринята попытка создания более эффективной МС (рисунок 3), которая сочетала бы в себе обеспечение достаточно высокой азимутальной однородности структуры магнитного поля при приемлемой теплонапряженности конструкции и повышенной механической прочности за счет применения в такой МС наружных катушек плоской формы, которые по периферии магнитного контура большим своим размером размещаются тангенциально относительно межполюсного промежутка [5]. Ниже представлены результаты сравнительного анализа распределений магнитного поля, созданных с помощью МС с цилиндрическими и плоскими сердечниками наружных катушек намагничивания.



**Рисунок 2 - Магнитный контур СПД-50 с МС с тремя наружными катушками цилиндрической формы**



**Рисунок 3 - Магнитный контур ПлаС-40 с МС с тремя наружными катушками плоской формы**

Для проведения сравнительного анализа различных конфигураций МС ее конструктивную схему наглядней представить в поперечном плане (рисунок 4). На рисунке обозначены основные элементы МС и основные геометрические размеры, характеризующие расположение наружных катушек намагничивания. Для наглядности рисунка азимутальная топология магнитного поля и тепловой поток  $Q$ , исходящий от разрядной камеры и проходящий через проемы длиной  $L_Q$  между наружными катушками, показаны условно.

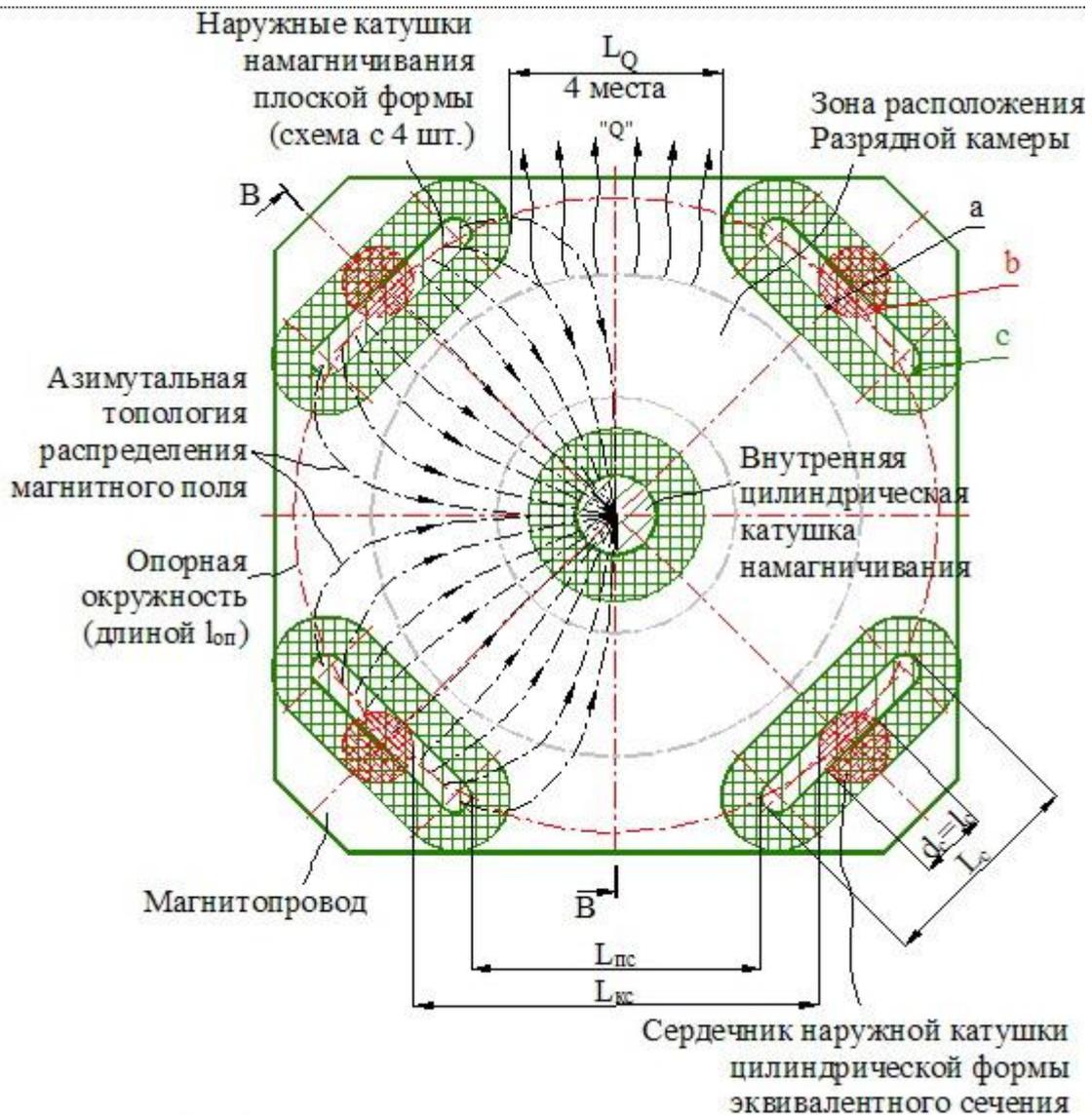
В электромагнитной технике внешняя часть магнитного контура круглых МС «броневая» типа, часто называемая ярмом 1 (рисунок 1), выполняется цилиндрической формы, который, являясь магнитным проводником по периферии, обеспечивает его прохождение с высокой азимутальной равномерностью распределения магнитного потока.

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

$$K_p = \frac{l_c}{l_{on}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $l_c$  – длина дуги занимаемой магнитопроводящим 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 ярмо вместе с одной наружной катушкой полностью охватывают основной источник тепловыделения – его разрядную камеру, ограничивая теплосброс излучением с ее внешних поверхностей.



**Рисунок 4 - Схема МС с четырьмя наружными катушками плоской формы**

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 составлять в зависимости от числа катушек от 9 до 11 %, что свидетельствует об относительно низком распределении магнитопроводящего материала по периферии МС. Кроме того, механическая стойкость такой конструкции МС недостаточно высока, т.к. она определяется несколькими цилиндрическими стержнями относительно малых диаметров и обеспечивается в основном за счет взаимного удаления друг от друга группы элементов  $L_{кс}$ . Как будет показано далее, такая схема 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, образующие между собой значительно меньшие проемы  $L_{nc}$ , позволяет достигнуть значений  $K_p$  от 30 до 57 %, что, как видно, значительно выше, чем в случае цилиндрических сердечников. При этом изменение удаленности различных участков боковой поверхности сердечников (рисунок 4,  $a$  – общая точка расположения близлежащих участков сердечников,  $b$  – наиболее удаленная точка поверхности цилиндрического сердечника, обращенная к УК и  $c$  – наиболее удаленная точка поверхности плоского сердечника, обращенная к УК) от формообразующей магнитную линзу кромки наружного полюса в местах их сопряжения в 2,5 раза меньше, что является более предпочтительным для обеспечения лучшей азимутальной равномерности распределения магнитной индукции. Учитывая изложенное, а также то, что расстояние между соседними сердечниками (рисунок 4)  $L_{nc}$  меньше  $L_{kc}$  в 1,5-2 раза, представляется возможным переход от МС с четырьмя цилиндрическими сердечниками, реализованной в двигателях СПД-70 и СПД-100, к эквивалентной схеме МС с тремя сердечниками плоской формы без ухудшения равномерности распределения магнитного поля в УК.

Переход к сердечникам плоской формы позволяет повысить и механическую устойчивость МС. Проведенные механические испытания моделей с МС, представленными на рисунках. 2 и 3, по определению критических резонансов в элементах конструкций в диапазоне частот от 5 до 2000 Гц показали, что при уровне воздействий 0,7g в двух взаимно перпендикулярных поперечных направлениях в МС с тремя катушками плоской формы нижняя собственная частота находится в диапазоне от 410 до 480 Гц. Аналогичная резонансная частота зафиксирована также и для МС с тремя цилиндрическими катушками, но при пониженном в 1,4 раза уровне механическом воздействии 0,5g, при этом коэффициенты усиления в конструктивных элементах МС с цилиндрическими катушками более, чем в 3,5 раза, выше. Таким образом, переход к МС с плоскими сердечниками наружных катушек намагничивания представляется оправданным. Поэтому был проведен более подробный расчетный анализ особенностей МС с плоскими сердечниками катушек намагничивания, результаты которого изложены в следующем разделе.

## 2. Результаты анализа влияния формы сердечников катушек намагничивания на распределение магнитного поля

Для выявления особенностей работы сердечников различной формы проведен анализ влияния основных параметров и характеристик наружных катушек намагничивания с различной формой сердечника (цилиндрической, плоской) с использованием результатов трехмерного моделирования образцов сердечников при помощи программы NISA/EMAG.

На первом этапе расчеты были проведены со следующими исходными данными:

- 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 ампер-витков (которая может обеспечиваться соленоидальными катушками или за счет применения постоянных магнитов) 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 (выбрана, исходя из типичных размеров, примыкающих к ним магнитопровода и наружного магнитного полюса с толщинами от 2 до 5 мм).

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

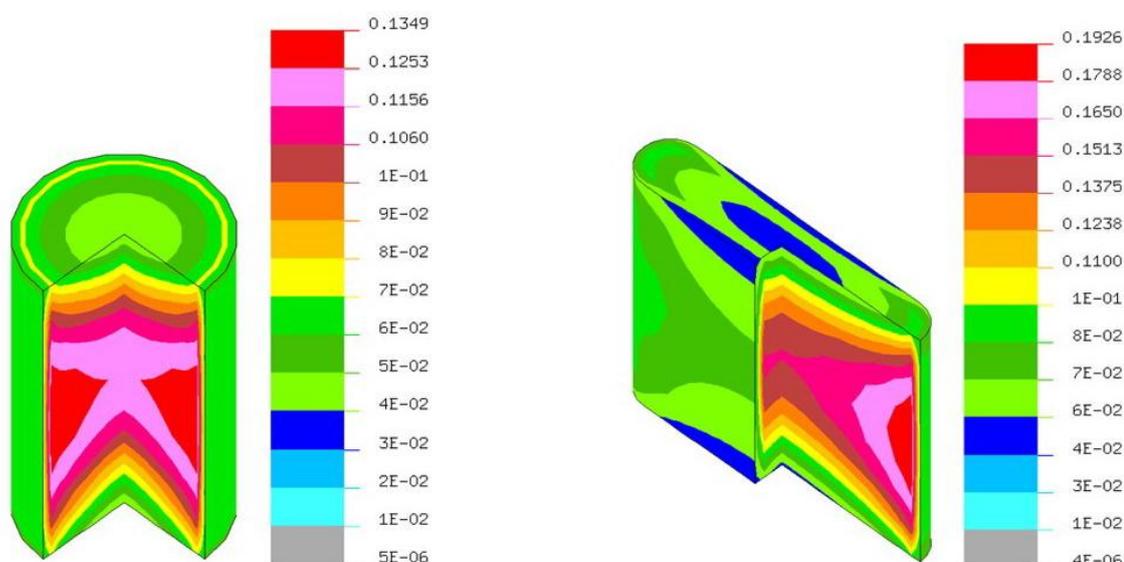


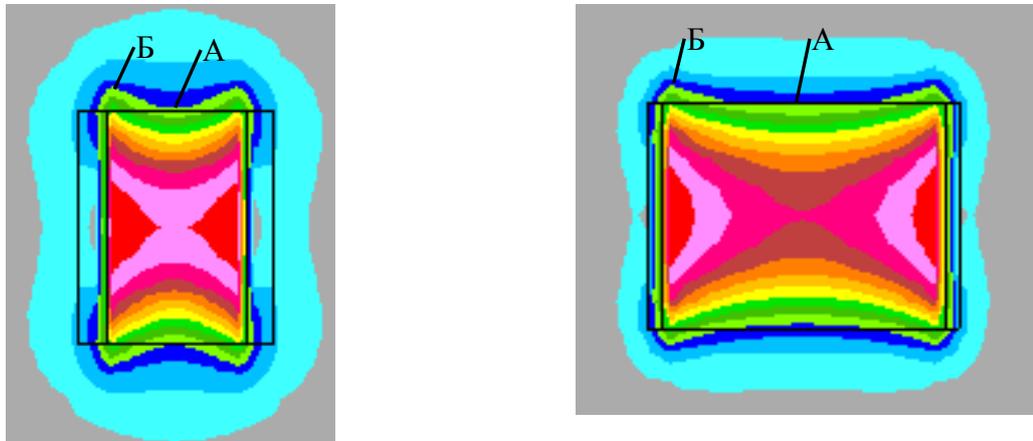
Рисунок 5 - Трехмерное распределение магнитной индукции в образцах сердечников различной формы

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

Максимальное значение магнитной индукции в цилиндрическом сердечнике составило 0,14 Тл, в плоском 0,19 Тл. Среднее по сечению значения индукции магнитного поля для двух рассматриваемых случаев составляют 0,13 Тл и 0,15 Тл соответственно.

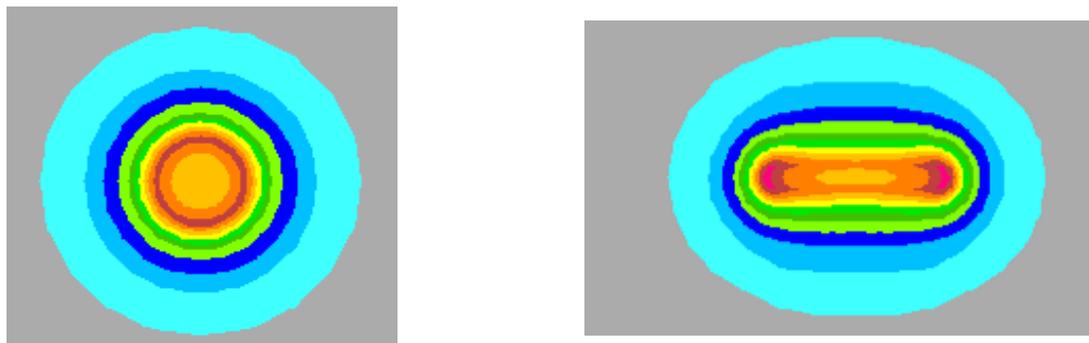
На рисунке 6 представлен характер распределения магнитной индукции по высоте исследуемых образцов.



**Рисунок 6 - Распределение магнитной индукции по высоте в образцах сердечников различной формы**

Анализ распределения магнитной индукции показывает, что над торцевыми поверхностями разница магнитной индукции, действующей в середине (точка А) и на краевых участках сердечников (точка В), для плоского элемента меньше в 1,5 раза, чем в цилиндрическом образце, что с точки зрения создания наилучших условий для обеспечения равномерности магнитных потоков со сторон их входа и выхода предпочтительней.

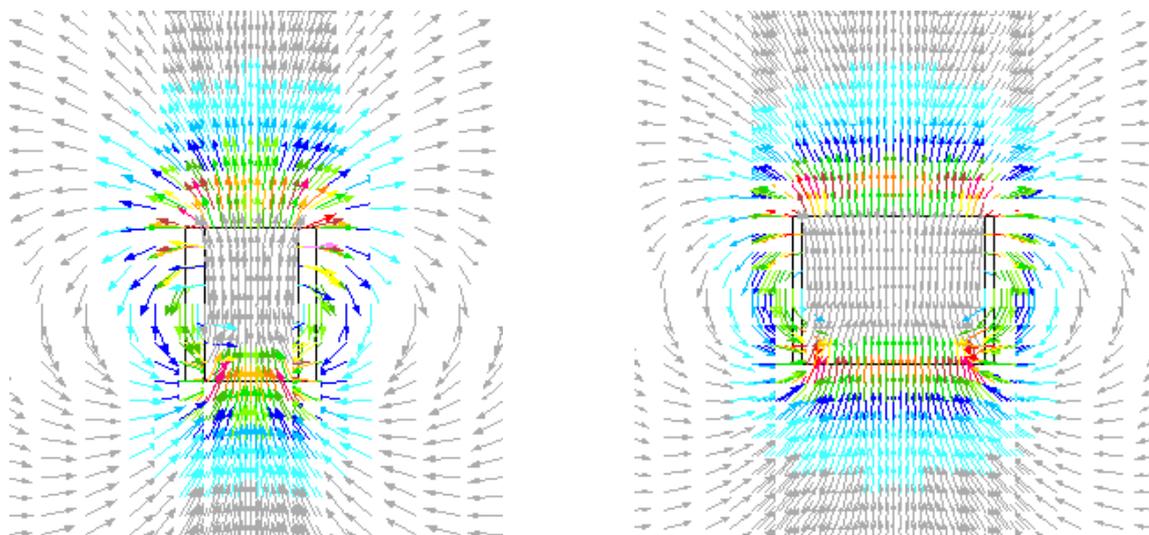
На рисунке 7 показаны распределения магнитной индукции над торцами на расстоянии 2,5 мм.



**Рисунок 7 - Распределения магнитных индукций над торцами сердечников различной формы на расстоянии 2,5 мм**

Как видно из приведенных рисунков, для цилиндрического образца распределение магнитного поля представляется строго концентрическим, а 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.

На рисунке 8 представлена векторная топология распределения магнитной индукции в сердечнике и в окружающей его области. Как видно, в случае плоского сердечника увеличивается протяженность зоны с постоянной индукцией магнитного поля вдоль направления с удлинения поперечного сечения сердечника. Таким образом, из приведенных данных следует, что возможно повышение азимутальной однородности распределения индукции магнитного поля в реальной МС с наружными катушками намагничивания, имеющими сердечники плоской формы.

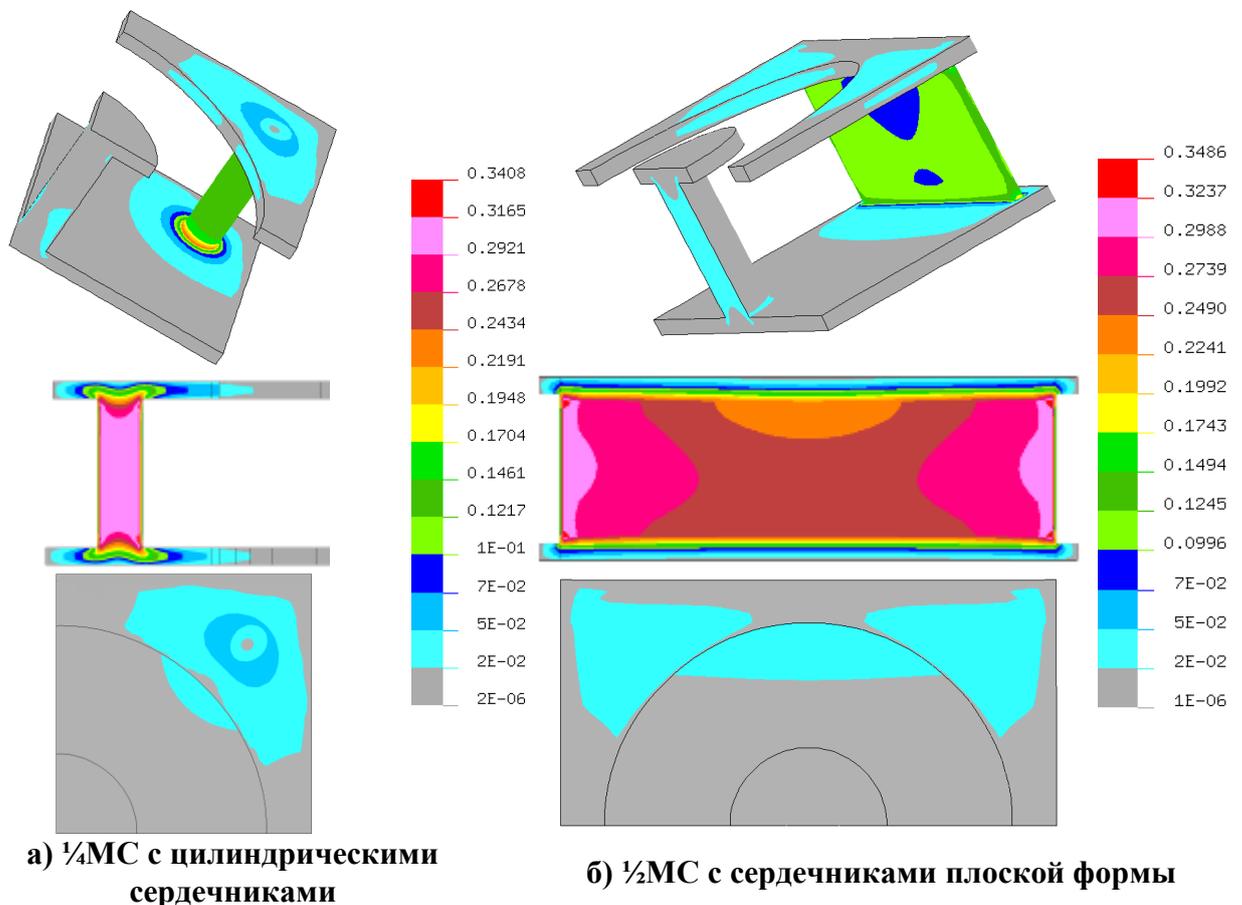


**Рисунок 8 - Векторная топология распределения магнитной индукции по высоте в образцах сердечников различной формы**

Для определения влияния общего распределения магнитных потоков рассеяния МС на уровень магнитной индукции и ее распределение в плоских и цилиндрических сердечниках наружных катушек при их интеграции в реальные МС ЭРД были выполнены

расчеты магнитного поля с помощью трехмерных моделей соответствующих МС. Расчеты выполнялись при одинаковых свойствах материала магнитопроводящих элементов и величине магнитодвижущей силы в наружных катушках намагничивания. Отличие состояло только в форме сердечников наружных катушек, выполненных при неоптимальной  $L_c$  для лучшей наглядности трансформации и перераспределения магнитных потоков на подобных участках различных МС (рисунок 9).

Как видно из приведенных данных, на выходных рабочих кромках наружных магнитных полюсов протяженность в азимутальном направлении распределения магнитных потоков, соответствующих одному уровню магнитной индукции, больше для варианта с плоскими сердечниками катушек, что является более предпочтительным.

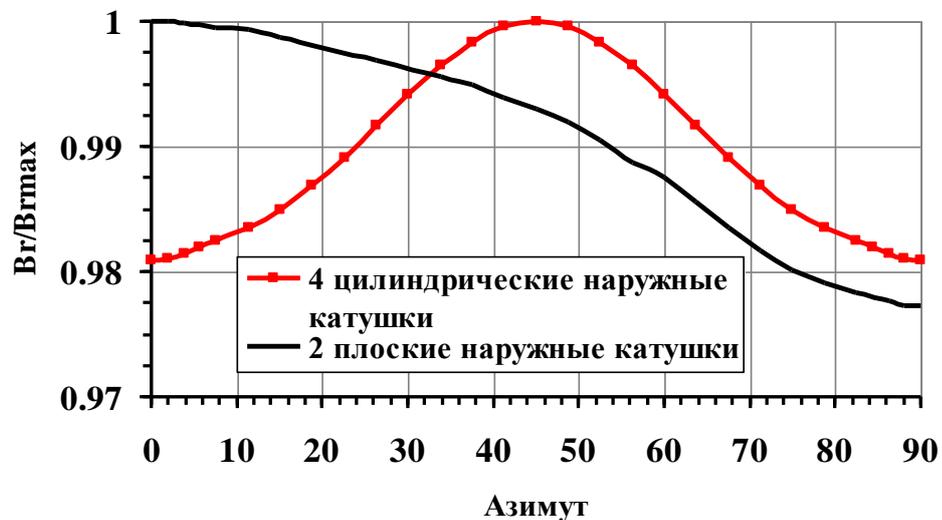


**Рисунок 9 - Распределение магнитного потока по конструкции трехмерной модели МС с сердечниками различной формы, а также соответствующее поперечное распределение потока по высоте сердечников**

Сравнение результатов расчетов МС (рисунок 9) с приведенными ранее на рисунке 6 свидетельствует о том, что характер распределения магнитного потока в сердечниках наружных катушек намагничивания в этих случаях аналогичен.

На рисунке 10 представлены нормированные зависимости распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности УК и в области среза УК для МС с четырьмя

наружными катушками цилиндрической формы и для варианта МС с двумя наружными катушками плоской формы, построенные по результатам магнитных расчетов соответствующих трехмерных моделей.

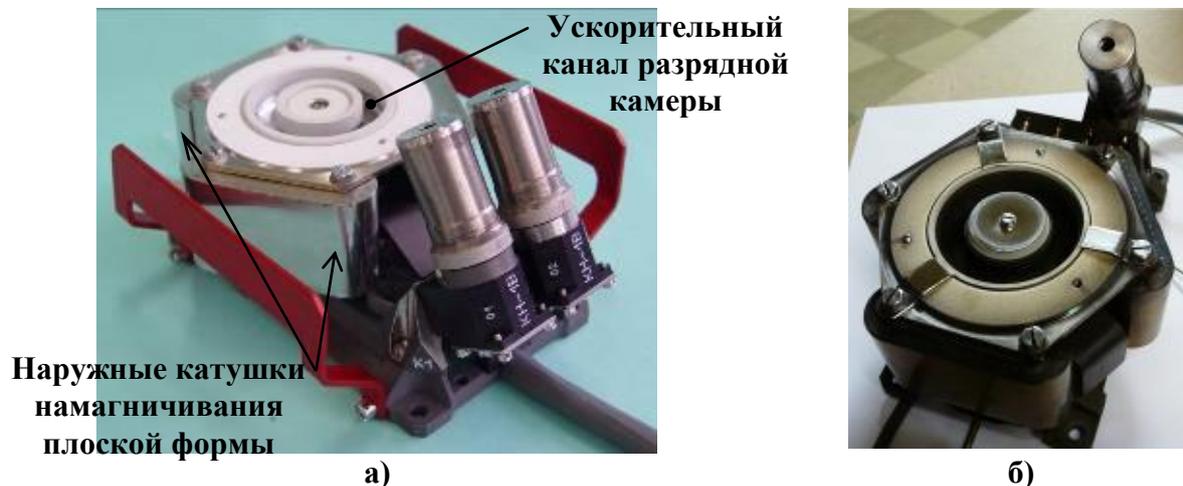


**Рисунок 10 - Изменение азимутальной неравномерности магнитной индукции посередине УК Ø85 мм на основе результатов магнитных расчетов при трехмерном моделировании МС при различном количестве наружных катушек намагничивания и формы их сердечников**

Из приведенных графиков видно, что изменение магнитной индукции в УК по азимуту однозначно зависит от количества и формы сердечников наружных катушек намагничивания, а также наличия промежутков между ними. Кроме того, из полученных данных следует, что переход от наружных цилиндрических катушек к меньшему количеству катушек с плоской формой сердечников позволяет получить сопоставимую азимутальную равномерность распределения индукции магнитного поля.

### 3. Результаты исследовательских испытаний

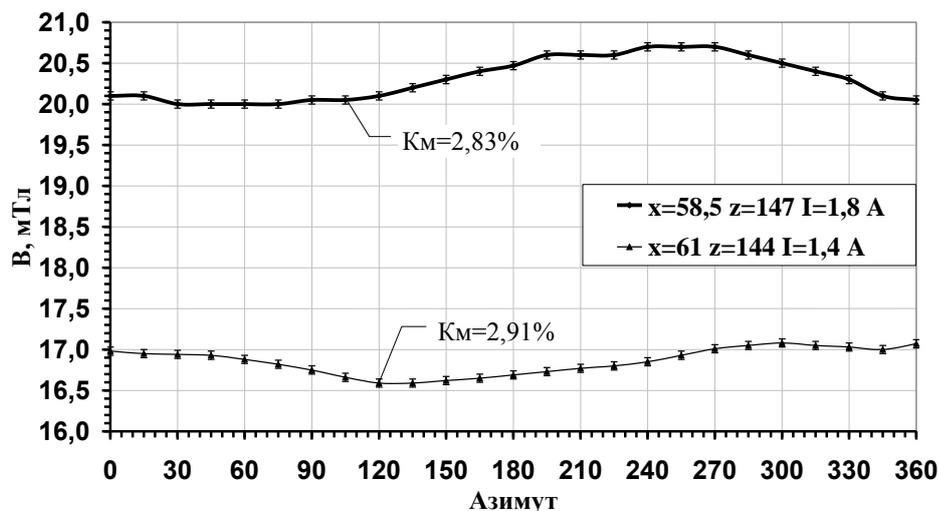
Для подтверждения приведенных выше выводов были проведены испытания модели ПлаС-40 с МС с плоскими сердечниками катушек намагничивания, внешний вид которой после проведения параметрических и ресурсных испытаний представлен на рисунке 11.



**Рисунок 11 - Внешний вид прототипа ПлаС-40 с МС, содержащей три наружные катушки намагничивания плоской формы а) после изготовления и б) после огневых испытаний с суммарной наработкой ~300 часов**

Ресурсные испытания модели ПлаС-40 проводились на различной мощности и включали в себя наработку по 100 ч на каждом из двух режимов: первый этап ресурса при мощности 200 Вт (при  $U_p=200$  В и  $I_p=1,0$  А), а второй этап испытаний проведен при мощности 400 Вт ( $U_p=280$  В и  $I_p=1,4$  А) в горизонтальной вакуумной камере при давлении во время работы двигателей не более  $1,2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. (по воздуху).

На изготовленном образце были проведены также магнитные измерения по определению неравномерности распределения магнитного поля по глубине в УК (рис.12).



**Рисунок 12 - Результаты измерений азимутальной неравномерности магнитной индукции в УК прототипа ПлаС-40 при различных токах в катушках намагничивания**

По результатам магнитных измерений определено, что азимутальная неоднородность распределения магнитной индукции в рабочем межполюсном промежутке МС на уровне с координатой  $X=61$  мм (вдоль оси модели), соответствующая уровню расчетного положения максимума магнитной индукции  $B_{max}$ , при различных токах запитывания последовательно соединенных катушек намагничивания, не превышает 3%, что существенно меньше допускаемой нормы по азимутальной неравномерности (не более 8%).

Как видно из графиков, изменения магнитной индукции в канале не связаны с месторасположением катушек намагничивания или промежутков между ними, а обусловлены низким классом точности изготовления отдельных элементов МС, что свидетельствует о возможности получения достаточно высокой азимутальной равномерности магнитного поля.

Для проверки возможности разработки эффективных моделей с плоскими катушками были проведены сравнительные параметрические испытания двигателей малой мощности СПД-50М и ПлаС-40 проводились при одних и тех же условиях и использовании одного и того же малорасходного экспериментального катода-компенсатора КЭ-1. Испытания проводились при напряжении разряда 160 и 200 В в диапазоне расходов от 1,25 до 2,00 мг/с в горизонтальной вакуумной камере при давлении во время работы двигателей не более  $1,2 \cdot 10^{-4}$  мм рт. ст. (по воздуху).

Для оценки уровня достигнутых параметров и характеристик были рассмотрены также близкие по типоразмеру двигатели КМ-32 [7] с серединным диаметром УК  $\varnothing 32$  мм и номинальной мощности 200 Вт, разработанный в исследовательском центре им. М.В. Келдыша (г. Москва), а также двигатель на постоянных магнитах НТ-100, разработанный компанией Alta S.p.A. (Италия) (таблица 1) [8].

Таблица 1

**Параметры различных двигателей малой мощности**

Модель	$U_d$ , В	$G_a$ , мг/с	$C_t$ , Вт/мН	$I_{вд}$ , с	$I_i/I_d$	$I_i/I_m$	КПД, %
СПД-50М	160	1,25	14,5	854	0,77	0,89	29,0
	200	1,25	14,9	1046	0,76	0,95	34,0
ПлаС-40	160	1,25	12,4	967	0,73	0,87	38,0
	200	1,25	12,8	1150	0,74	0,88	44,0
КМ-32 [7]	200	1,4	16,4	1019	0,74	0,94	29,1
НТ-100 [8]	200	1,0	17,6	1030	-	-	29,0

Анализ параметров и характеристик различных российских и ближайших их аналогов зарубежных моделей плазменных двигателей, представленных в таблице 1, позволяет определить, что наилучшими удельными параметрами и характеристиками при мощности в диапазоне 100-400 Вт и напряжении разряда 160 и 200 В обладает модель двигателя

ПлаС-40, которая обеспечивает при прочих равных условиях больший удельный импульс тяги и тяговый к.п.д. Следует отметить, что отмеченная разница определяется не только различием магнитных систем, но и различием конструктивных схем двигателей и разной степенью их оптимизации. В целом же приведенные данные подтверждают возможность создания достаточно эффективных моделей ЭРД с наружными катушками намагничивания, имеющими сердечники плоской формы.

### **Заключение**

В результате проведенных исследовательских работ предложен новый способ повышения азимутальной однородности распределения магнитного поля в ускорительном канале ЭРД. В отличие от известного способа, при котором указанная задача решается путем простого увеличения количества наружных цилиндрических катушек намагничивания и соответствующего уменьшения пролетов между ними, новое техническое решение способствует повышению однородности распределения магнитного поля в УК за счет трансформации поперечного сечения сердечников и переходу к плоской их форме. При этом экспериментально подтверждена возможность снижения азимутальной неоднородности магнитного поля в области межполюсного промежутка, коэффициент которой составляет не более 3%. Таким образом, применение в МС наружных катушек намагничивания с сердечником плоской формы при выбранной их оптимальной длине  $L_c$  позволяет максимально приблизиться к высокой однородности, достигаемой в МС с одной общей кольцевой катушкой намагничивания. Данное техническое решение также позволяет повысить надежность МС в целом за счет минимизации количества катушек, а также упрощения электрической схемы такой МС и сокращения количества электрических соединений между катушками намагничивания. Кроме того, применение таких катушек позволяет повысить механическую стойкость МС.

### **Библиографический список**

---

1 Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов. Стационарные плазменные двигатели // Учеб. пособие – Харьков: Харьк. авиац. ин-т, 1989, 315 с.

2 V.V. Gopanchuk, M.Yu. Potapenko. Analysis of modern electric propulsion thrusters with high specific impulse // International Russian-American Scientific Journal "Actual problems of aviation and aerospace systems", Kazan-Daytona Beach, 1(32), v.16, 2011, s. 64-77..

3 А.И. Морозов и др. Стационарный плазменный ускоритель-двигатель АТОН // Физика плазмы. №7. Т.23, 1997.

---

4 A.Bober, N.Maslennikov, M.Day, G.Popov, Yu.Rylov. Development and Application of Electric Thrusters in Russia – paper IEPC-93-001, 23rd International Electric Propulsion Conference, September 13-16, 1993, Seattle, USA.

5 В.В. Гопанчук, Н.М. Никулин, М.Ю. Потапенко. Оптимизация магнитных систем электрореактивных двигателей // Вестник Московского авиационного института, 2011, №1, т.18, с. 64-74.

6 V.V. Goranchuk, M.Yu. Potapenko. Analysis of modern electric propulsion thrusters with high specific impulse // International Russian-American Scientific Journal "Actual problems of aviation and aerospace systems", Kazan-Daytona Beach, 1(32), v.16, 2011, s. 64-77..

7 Mikhail B. Belikov, Oleg A. Gorshkov, Evgeny N. Dyshlyuk, Aleksandr S. Lovtsov, Andrey A. Shagayda. Development of Low-Power Hall Thruster with Lifetime up to 3000 Hours // IEPC-2007-129, Florence, Italy.

8 P. Rossetti, M. Andrenucci. HT-100 Development Status // IEPC-2009-126, 31st International Electric Propulsion Conference, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, September 20-24, 2009.

#### **Сведения об авторах**

Владимир Васильевич Гопанчук – ведущий конструктор ФГУП ОКБ «Факел», г. Калининград, 8 (4012) 55-66-62;

Ольга Александровна Митрофанова - аспирант. БФУ им. И.Канта, инженер ФГУП ОКБ «Факел», г. Калининград, 8 (4012) 55-69-22, mitriki@mail.ru;

Мира Юрьевна Потапенко – аспирант. БФУ им. И.Канта, инженер ФГУП ОКБ «Факел», г. Калининград, 8 (4012) 55-66-20, mira-world@yandex.ru.