

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В УСКОРИТЕЛЬНОМ КАНАЛЕ ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В.В. Гопанчук, М.Ю. Потапенко
(ФГУП ОКБ «Факел»)

Представлены результаты исследования структуры магнитного поля в ускорительном канале электрореактивного двигателя и фокусирующих свойств магнитной линзы путем определения фронтального распределения максимальной радиальной составляющей индукции магнитного поля B_{rmax} по ширине ускорительного канала. Показано, что для повышения точности анализа о достигаемом уровне магнитного поля и соответствующих магнитных потоков, влияющих на фокусирующие свойства магнитной линзы, необходимо определять предельное (минимальное) значение B_{rmax} и его месторасположение в ускорительном канале.

Ключевые слова: холловский электрореактивный двигатель, стационарный плазменный двигатель, гибридный плазменный двигатель, магнитная система, топология магнитного поля, магнитная линза.

Для высокоимпульсных электрореактивных двигателей (ЭРД) одной из задач является обеспечение ресурса его работы. Сегодня к перспективным ЭРД предъявляются требования по обеспечению ресурсной наработки не менее 10 000 ч и не менее $3 \cdot 10^6$ Н·с по выработке суммарного импульса тяги. Одним из критичных факторов, ограничивающих ресурс двигателя, является износ стенок разрядной камеры (РК) вследствие ионной бомбардировки. Направление движения ионов зависит от распределения электрического потенциала, которое определяется структурой магнитного поля в ускорительном канале (УК), формируемой при помощи магнитной системы (МС) ЭРД. О достигаемом уровне магнитного поля в любом ЭРД судят по распределению магнитной индукции, как правило, посередине УК на участке от анода до области среза РК. Другим наиболее важным вопросом при разработке МС является достижение оптимальных фокусирующих свойств так называемой магнитной линзы и ее ориентации относительно продольной оси ЭРД [1].

Целью данной работы являлось исследование структуры магнитного поля в УК и распределения радиальной составляющей индукции магнитного поля по ширине УК в ЭРД для повышения точности проводимого анализа структуры магнитного поля и последующей оценки конфигурации и расположения магнитной линзы.

Анализ конструкций двигателей и модулей различных типоразмеров показывает, что в большинстве случаев середина УК не совпадает с серединой межполюсного промежутка, что само по себе не является критичным, так как минимум магнитного поля в межполюсном промежутке может быть расположен в любом месте. В первую очередь на ме-

стоположение минимума магнитного поля оказывает влияние целый ряд параметров и характеристик МС: количество источников намагничивающей силы, их размещение вдоль магнитного контура, ампер-витки в каждом источнике и, что самое важное, взаимное соотношение ампер-витков между наружным и внутренним источниками намагничивания, а также геометрические размеры элементов самой МС, которые преимущественно определяют конфигурацию магнитной линзы в межполюсном промежутке во фронтальной зоне среза УК. В такой ситуации становится важным определение предельного уровня магнитного поля и соответствующего распределения B_r вдоль УК, а следовательно, и соответствующей топологии силовых линий магнитного поля в межполюсном промежутке. В противном случае, оценка достигаемого уровня магнитного поля в УК будет выполнена с большой погрешностью из-за неточного определения геометрического расположения минимального значения B_{rmax} по ширине канала. Вследствие чего анализ уровня магнитного поля и топологии магнитной линзы будет произведен по некоторому промежуточному текущему значению B_{rmax} .

Для оценки асимметричности расположения середины УК относительно наружного и внутреннего магнитных полюсов используется коэффициент γ , рассчитываемый по формуле:

$$\gamma = \frac{L_{в.п.}}{L_{н.п.}}, \quad (1)$$

где $L_{в.п.}$ – расстояние от середины УК до внутреннего магнитного полюса, мм; $L_{н.п.}$ – расстояние от середины УК до наружного магнитного полюса, мм.

Таблица 1

Результаты анализа параметра γ для двигателей

Двигатель	Диаметр середины УК, мм	γ
СПД-100	85	1,22
PPS 1350R	85	1,16
SPT-1	85	1,25
Модуль М70БР	55	1,23
Модуль М50	40	1,13
Прототип ПлаС-40	40	1,00

Таблица 2

Параметры МС двигателей

Параметры	СПД-100	PPS 1350R	SPT-1	Прототип ПлаС-40
$J_{\text{вн}}, \text{А/М}^2$	$1,1 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^6$	$1,32 \cdot 10^6$	$1,67 \cdot 10^6$
$J_{\text{нар}}, \text{А/М}^2$	$0,8 \cdot 10^6$	$0,8 \cdot 10^6$	$3,36 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^6$
$J_{\text{анод}}, \text{А/М}^2$	–	$1,4 \cdot 10^6$	–	–
$I_{\text{кв}}, \text{А}$	4,5	4,3	6,3	2
$I_{\text{кн}}, \text{А}$			8,5	
$\omega_{\text{вн}}, \text{ВИТКИ}$	205	233	235	200
$\omega_{\text{нар}}, \text{ВИТКИ}$	85	89	201	150
$\omega_{\text{анод}}, \text{ВИТКИ}$	–	по 4 в секции	–	–
$(I\omega)_{\Sigma}, \text{ампер-витки}$	1305	1341,6	3189	700
$(I\omega)_{\text{вн}}, \text{ампер-витки}$	922,5	958,9	1708,5	400
$(I\omega)_{\text{нар}}, \text{ампер-витки}$	382,5	382,7	1480,5	300
$(I\omega)_{\text{вн}}/(I\omega)_{\text{нар}}$	2,4	2,5	1,2	1,3
$(I\omega)_{\text{анод}}, \text{ампер-витки}$	–	по 17,2 в секции	–	–

Результаты анализа величин коэффициента γ для различных моделей ЭРД представлены в табл. 1.

Как видно, УК (а соответственно и их середины) во всех исследуемых ЭРД, как правило, смещены на некоторую величину в сторону наружного магнитного полюса ($\gamma > 1$). Такое смещение обусловлено различиями магнитных потоков, генерируемых в моделях центральным и наружным источниками намагничивающей силы. Указанное смещение середины УК в сторону наружного магнитного полюса, в конечном результате, и является частичной попыткой максимально совместить ее с координатой минимального значения радиальной составляющей индукции магнитного поля. Однако

такая величина смещения в различных моделях не подпадает ни под один из известных критериев подобия для единого параметрического ряда и аналогий конструкций, а напротив, является величиной произвольной, и вероятно обусловленной обеспечением других требований конструкции, например, обеспечения компактности расположения элементов ЭРД.

Таким образом, учитывая, что величина и расположение B_{max} всегда зависит от одновременного действия множества параметров и приведенные выше результаты анализа по критерию коэффициента асимметричности расположения середины УК γ для проведения более качественного анализа

структуры магнитного поля в канале с более высокой точностью и определения области максимальных значений B_r , необходимо сначала определить фронтальное распределения B_{rmax} по всей ширине УК и месторасположение наименьшего значения B_{rmax} (определяющее положение оси симметрии магнитной линзы в УК). Такой более детальный анализ в конечном итоге позволяет получить представление о фактической форме границ, по которым можно судить о фокусирующих свойствах магнитной линзы в пределах УК.

Проанализируем структуру и уровень магнитного поля в УК в двигателях СПД-100, PPS 1350R, лабораторной модели SPT-1 и прототипе Плас-40 и определим фактическое фронтальное распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля B_{rmax} по ширине УК. Кроме того, по выявленной области максимальных значений магнитного поля определим конфигурацию и оценим физические свойства магнитной линзы, а также ее геометрическое расположение в УК – ориентацию. Определение параметров и характеристик выполним при помощи расчета магнитных полей с использованием программы NISA/EMAG для варианта решения эквивалентной двумерной осесимметричной задачи. Расчетные данные для сравнительного анализа сведены в табл. 2.

Так, например, расчетная плотность тока в катушках намагничивания двигателя СПД-100 определяется исходя из его рабочих параметров, характеристик и других конструктивных параметров и составляет соответственно $J_{вн} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ и $J_{нар} = 0,8 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Так как в данном двигателе источники намагничивающей силы включены в разрядную цепь, то ток в катушках намагничивания равен разрядному току $I_{кат} = I_p = 4,5 \text{ А}$. Во внутренней катушке $\omega_{вн} = 205$ витков, а в четырех наружных катушках по $\omega_{нар} = 85$ витков, навитых обмоточным проводом $d_{нар} = 1,5 \text{ мм}$. Таким образом, генерируемый магнитный поток в магнитном контуре МС двигателя СПД-100 и индукция в межполюсном промежутке (и соответственно в области среза УК) обеспечиваются суммарной намагничивающей силой $(I\omega)_{\Sigma} = 1305$ ампер-витков (соответственно $(I\omega)_{вн} = 922,5$ ампер-витков и $(I\omega)_{нар} = 382,5$ ампер-витков, при их соотношении $922,5/382,5 \approx 2,4$). В результате наименьшее значение B_{rmax} в УК составляет 154,5 Гс (в статье наряду с единицами измерения в системе СИ используются и несистемные единицы, которые широко распространены в повседневной технической практике и в инженерном общении, так как эти единицы используются в

ТЗ, шкалах приборов и являются производными от системных единиц. Например, тяга двигателя указывается в [Н] и в [гс]; величина магнитной индукции приведена не в [Тл], а в [Гс]). Типовой размер двигателя СПД-100 по середине УК $d = 85 \text{ мм}$. За начало отсчета ($z = 0$) принята внутренняя посадочная плоскость наружного магнитного полюса, а соответственно, срез РК расположен с координатой $z = 8 \text{ мм}$.

Необходимо отметить, что в настоящее время единого мнения о нижней границе области максимальных значений магнитного поля, определяющих границы магнитной линзы и характеризующих протяженность зоны ионизации и ускорения, не существует. Так если верхняя граница соответствует B_{rmax} , то о нижней границе по различным источникам информация неоднозначна, и ее положение может соответствовать и $0,5 B_{rmax}$ [2], и $0,6 B_{rmax}$ [3], и $0,7 B_{rmax}$ [4] и даже $0,8 B_{rmax}$ [5].

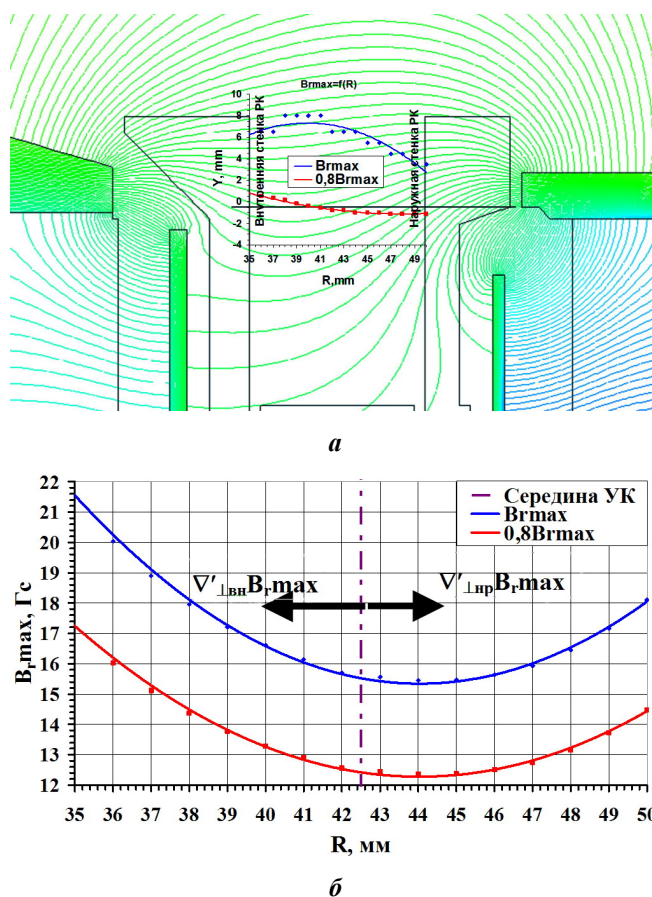


Рис. 1. Топология магнитного поля в межполюсном промежутке двигателя СПД-100: а – область действия максимальных магнитных полей от B_{rmax} до $0,8 B_{rmax}$ в пределах УК; б – зависимости B_{rmax} и $0,8 B_{rmax}$ по ширине канала

Поскольку ускорение ионов происходит в условиях действия скрещенных электромагнитных полей, то на траекторию их движения оказывают влияние следующие факторы: во-первых, характер распределения электрического потенциала по ширине УК, во-вторых, изменения структуры магнитного поля от середины канала по направлениям к стенкам РК. Таким образом, определить месторасположение магнитной линзы относительно середины УК возможно с помощью градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля $\nabla B_{r\max}$ как параметра, отражающего скорость изменения магнитного поля в рассматриваемых направлениях. Таким параметром в данном случае является поперечный компонент градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля $\nabla_{\perp} B_{r\max}$, который влияет на распределение электронов вдоль силовых линий магнитного поля в канале и равномерность их распределения, т. е. их концентрацию, а следовательно, и на распределение электрического потенциала по ширине УК в области среза РК. Проведенные исследования подтверждают вероятность возникновения неравномерной концентрации электронов в УК, что может приводить к изменениям траекторий ускоряемых ионов в различных областях ширины УК [6].

На рис. 1, а представлено геометрическое фронтальное распределение $B_{r\max}$ в пределах между стенками РК двигателя СПД-100 на фоне общей топологии силовых линий действующих суммарных магнитных потоков, а на рис. 1, б соответствующее распределение $B_{r\max}$ по ширине канала. Оценим «физическую» симметричность магнитной линзы в координатах относительно УК путем сравнения изменения структуры магнитного поля от середины УК в двух взаимно противоположных направлениях – к соответствующим магнитным полюсам МС (в поперечном направлении относительно потока плазмы). Проанализируем «левую» и «правую» ветви полученной зависимости, при этом сравним действующие соответствующие поперечные компоненты градиента радиальной составляющей магнитного поля $\nabla_{\perp} B_{r\max}$ в пределах ширины канала. В случае же несовпадения расположения минимального значения $B_{r\max}$ (или значения $0,8B_{r\max}$) с серединой УК $\nabla_{\perp} B_{r\max}$ вычисляется с учетом данного эффекта, а именно спадающего и нарастающего изменений действующего магнитного поля.

Так в идеальном случае «физической» симметричности магнитной линзы, характеризующей соотношение степеней «замагниченности» электро-

нов в двух взаимно противоположных направлениях от середины УК, должно выполняться следующее условие:

$$\Psi = \frac{\nabla'_{\perp\text{пр}} B_{r\max}}{\nabla'_{\perp\text{вн}} B_{r\max}} = 1, \quad (2)$$

где Ψ – коэффициент «физической» симметричности магнитной линзы относительно середины УК; $\nabla'_{\perp\text{пр}} B_{r\max}$ – поперечный компонент градиента $B_{r\max}$ от середины УК в направлении наружного магнитного полюса; $\nabla'_{\perp\text{вн}} B_{r\max}$ – поперечный компонент градиента $B_{r\max}$ от середины УК в направлении внутреннего магнитного полюса.

Поперечный компонент градиента $B_{r\max}$ от середины УК в направлении внутреннего магнитного полюса рассчитывается по формуле

$$\nabla'_{\perp\text{вн}} B_{r\max} = \frac{B_{r\max\text{вн}} - B_{r\max\text{пр}}}{|R_{\text{пр}} - R_{\text{вн}}|}, \quad (3)$$

где $B_{r\max\text{вн}}$ – максимальное значение радиальной составляющей индукции магнитного поля вблизи внутренней стенки УК; $B_{r\max\text{пр}}$ – предельное (наименьшее) максимальное значение радиальной составляющей индукции магнитного поля в УК; $R_{\text{вн}}$ – координата $B_{r\max\text{вн}}$ по ширине УК; $R_{\text{пр}}$ – координата $B_{r\max\text{пр}}$.

Поперечный компонент градиента $B_{r\max}$ от середины УК в направлении наружного магнитного полюса рассчитывается аналогично (3).

При $\Psi \neq 1$ ускоряемые ионы будут преимущественно отклоняться в зону наибольшей концентрации электронов, распределение которых происходит под действием $\nabla_{\perp} B_{r\max}$, и траектория движения ионов будет в разной степени искривляться. Если $\Psi < 1$, то ускоряемые ионы отклоняются преимущественно в сторону внутреннего магнитного полюса и, чем меньше значение этого параметра, тем больше будет отклонение ускоренного потока в данном направлении, а степень износа стенки РК при этом возрастет.

В случае же $\Psi > 1$ ускоряемые ионы отклоняются преимущественно в сторону наружного магнитного полюса и, чем больше его значение, тем больше отклонение (прижатие) ионного потока к наружной стенке РК. Следовательно по данному параметру можно судить о характере преимущественного истечения ускоренного потока плазмы и о степени его воздействия на стенки УК. Как видно, по рассчитанной зависимости распределения $B_{r\max}$ по ширине канала (выраженного через радиус мо-

дели), представленной на рис. 1, б, наименьшее значение $B_{r\max}$ в радиальном направлении (середина магнитного поля) не совпадает с серединой УК, и такое расхождение между ними достигает 1,5 мм со смещением в сторону наружного магнитного полюса и, соответственно, в сторону наружной стенки РК. Разница между $B_{r\max}$, действующим по середине УК, и наименьшим значением $B_{r\max}$ составляет 2,22%, а следовательно, различны будут и соответствующие им топологии магнитных потоков (рис. 2).

На рис. 2 штрихпунктирные линии (красного цвета) показывают диапазон магнитных потоков, соответствующих диапазону магнитной индукции, действующей по середине УК от $B_{r\max}$ (157,8 Гс) до $0,7B_{r\max}$ (110,5 Гс), а три сплошных линии (черного цвета) показывают диапазон магнитных потоков, соответствующих наименьшему значению магнитной индукции $B_{r\max}$ (154,5 Гс) до $0,7B_{r\max}$ (108,2 Гс). Как видно, фронтальная граница магнитных потоков имеет расхождение от 2,5 до 3,0 мм, тогда как расхождение нижних границ потоков, соответствующих $0,7B_{r\max}$, составляет всего 0,25 мм. Такая относительно низкая точность снижает качество проведения анализов по оценке конфигурации магнитной линзы в УК и, что особенно важно, при оценке положения максимума магнитного поля относительно среза РК.

Таким образом, величина параметра «физической» симметричности Ψ магнитной линзы относительно середины УК для двигателя СПД-100 составляет 0,6 при $B_{r\max\text{вн}} = 215,4$ Гс ($R_{\text{вн}} = 35$ мм), $B_{r\max\text{нр}} = 181,0$ Гс ($R_{\text{нр}} = 50$ мм), $B_{r\max\text{сп}} = 154,52$ Гс

($R_{\text{нр}} = 44$ мм), $\nabla'_{\perp\text{вн}}B_{r\max} = 6,7$ Гс/мм; $\nabla'_{\perp\text{нр}}B_{r\max} = 4$ Гс/мм (при изменении знака индукции рассчитанное по двум слагаемым, т. е. $\nabla'_{\perp\text{нр}}B_{r\max1} = -0,67$ Гс/мм и $\nabla'_{\perp\text{нр}}B_{r\max2} = 4,67$ Гс/мм). Это свидетельствует о том, что ускоренный поток ионов при своем истечении в большей степени прижимается к внутренней стенке РК. Как видно из полученных данных, действующие поперечные компоненты градиентов $B_{r\max}$ по ширине канала соизмеримы и даже при этом больше в сравнении с действующим продольным компонентом градиента $B_{r\max}$ по середине УК.

Проведем аналогичный анализ для другой подобной конфигурации МС двигателя PPS 1350R. В конструкции двигателя кроме наружных и внутренней катушек имеется также дополнительная двухсекционная анодная катушка намагничивания, плотность тока в которой составляет $J_{\text{анод}} = 1,4 \cdot 10^6$ А/м², а количество витков в одной секции равно 4 ($\omega_{\text{анод}} = 4$ витка). При этом анодная катушка генерирует магнитный поток противоположного основному потоку направления, действие которого преимущественно только в прианодной области. Каждая секция анодной катушки при работе обеспечивает $(I\omega)_{\text{анод}} = 17,2$ ампер-витков.

Таким образом, по результатам расчетов наименьшее значение $B_{r\max}$ в УК составляет 141 Гс. Серединный диаметр двигателя УК PPS 1350R аналогичен диаметру СПД-100 и составляет 85 мм. За начало отсчета ($z = 0$) принята внутренняя посадочная плоскость наружного магнитного полюса и, соответственно, срез РК расположен с координатой $z = 8$ мм.

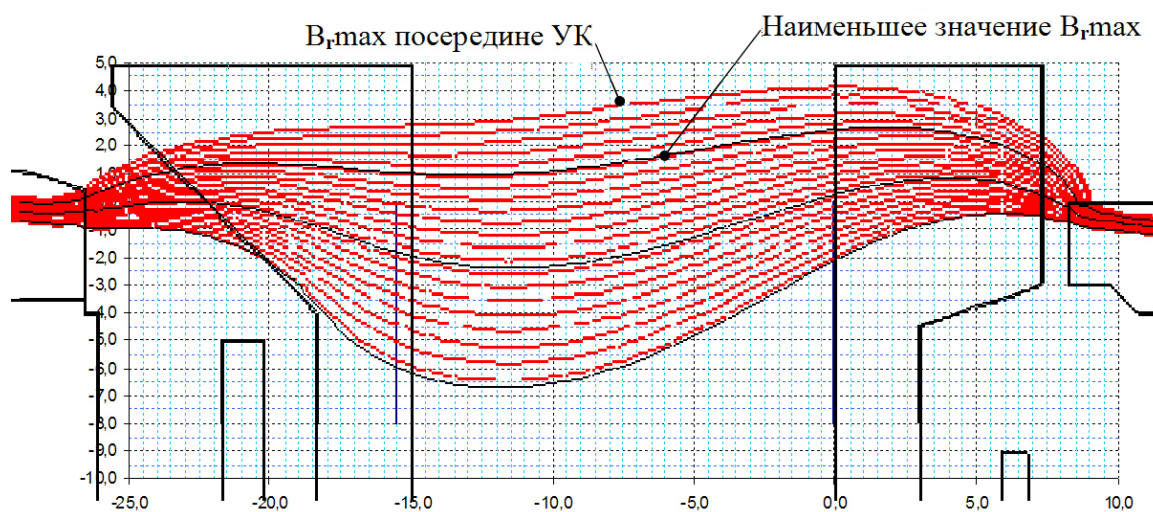


Рис. 2. Топологии магнитных потоков в межполюсном промежутке двигателя СПД-100, соответствующих $B_{r\max}$ на середине УК и наименьшему значению $B_{r\max}$

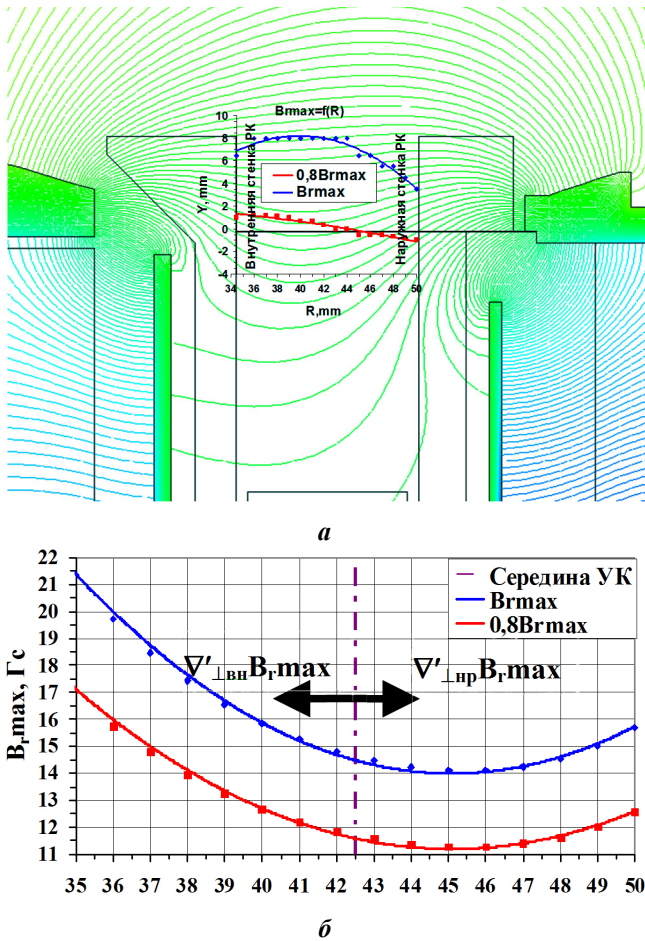


Рис. 3. Топология магнитного поля в межполюсном промежутке двигателя PPS 1350R: а – область действия максимальных магнитных полей по ширине УК; б – распределения B_{rmax} и $0,8B_{rmax}$ по УК

Геометрическое фронтальное распределение B_{rmax} в пределах между стенками РК двигателя PPS 1350R на фоне общей топологии силовых линий действующих суммарных магнитных потоков и распределение B_{rmax} по ширине канала представлены на рис. 3, а и б.

В таком двигателе удаление минимального значения B_{rmax} в радиальном направлении от середины УК составляет 2,5 мм со смещением в сторону наружного магнитного полюса (различие между B_{rmax} по середине УК и наименьшим значением B_{rmax} составляет 3,42%). Значение параметра Ψ составляет уже 0,2 при $B_{rmaxвн} = 214,0$ Гс ($R_{вн} = 35$ мм), $B_{rmaxнр} = 157,0$ Гс ($R_{нр} = 50$ мм), $B_{rmaxпр} = 141,0$ Гс ($R_{пр} = 45$ мм), $\nabla'_{\perp вн} B_{rmax} = 7,7$ Гс/мм; $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax} = 1,6$ Гс/мм (т. е. с учетом изменения знака параметра двух слагаемых $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax1} = -1,6$ Гс/мм и $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax2} = 3,2$ Гс/мм). Это свидетельствует о возрастании степени прижатия ускоренного потока ионов к внутренней стенке при истечении из РК по сравнению с двигателем СПД-100.

Сравнительный анализ двигателей СПД-100 и PPS 1350R показывает, что структура магнитного

поля в области зон ионизации и ускорения различна, причем $\nabla'_{\perp вн} B_{rmax}$ в двигателе PPS 1350R больше, чем $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax}$. Таким образом, при истечении поток ускоряемых ионов в двигателе PPS 1350R в большей степени наклонен в направлении к оси двигателя из-за перераспределения электрического потенциала в зоне магнитной линзы. В результате этого внутренняя стенка РК подвержена более интенсивному износу в процессе длительного ресурса, что является одной из вероятных причин различия скоростей износа стенок РК, что подтверждается сравнением результатов проведенных ресурсных испытаний квалификационных моделей SPT-100B [7] и отработочной модели двигателя PPS 1350DMг [8, 9], для которой была зафиксирована более интенсивная скорость износа внутренней стенки РК при одновременном снижении скорости износа наружной стенки РК.

Анализ конфигурации МС лабораторной модели двигателя SPT-1 выполнялся аналогичным образом. Расчетное наименьшее значение B_{rmax} составило 317 Гс. В конструкции МС двигателя SPT-1 внутренний и наружный магнитные экраны установлены с продольными внутренними зазорами 8 мм и 10 мм соответственно относительно базового магнитопровода.

Такие зазоры между магнитными экранами и магнитопроводом позволяют локально увеличить магнитное сопротивление на близрасположенных участках во вторичных магнитных контурах, образующихся через магнитные экраны. Такое техническое решение является альтернативным по размещению дополнительной анодной катушки намагничивания в зоне соединений магнитных экранов с магнитопроводом в заанодной области, так как это также позволяет снизить магнитные потоки, проходящие через магнитные экраны, что в конечном итоге позволяет снизить магнитное поле преимущественно в прианодной области.

В модели SPT-1 несовпадение расположения минимального значения B_{rmax} с серединой УК составляет 0,5 мм со смещением в сторону наружного магнитного полюса (разница составляет 0,63%) (рис. 4). Параметр «физической» симметричности магнитной линзы Ψ составляет 0,7 (при $B_{rmaxвн} = 406,0$ Гс ($R_{вн} = 35$ мм), $B_{rmaxнр} = 387,3$ Гс ($R_{нр} = 50$ мм), $B_{rmaxпр} = 317,0$ Гс ($R_{пр} = 43$ мм), $\nabla'_{\perp вн} B_{rmax} = 11,6$ Гс/мм; $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax} = 8$ Гс/мм, т. е. $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax1} = -2$ Гс/мм; $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax2} = 10$ Гс/мм).

Полученные данные анализа конструкции SPT-1 свидетельствует о достижении в его конструкции несколько лучшей геометрической ориентации маг-

нитной линзы и выравнивания ее краев с разворотом в пределах УК к оси двигателя, что привело к улучшению ее фокусирующих свойств. Данный результат достигнут за счет уменьшения разницы как по геометрическому расположению границ зон ионизации и ускорения, так и по величине B_{rmax} по краям линзы на стенках канала, а также за счет более близкого расположения минимума магнитного поля относительно середины УК. Такое улучшение «физической» симметричности магнитной линзы приводит к снижению вероятности преимущественного прижатия ускоренного потока ионов при истечении к внутренней или наружной стенкам РК в сравнении с аналогичными характеристиками двигателей СПД-100 и PPS 1350R.

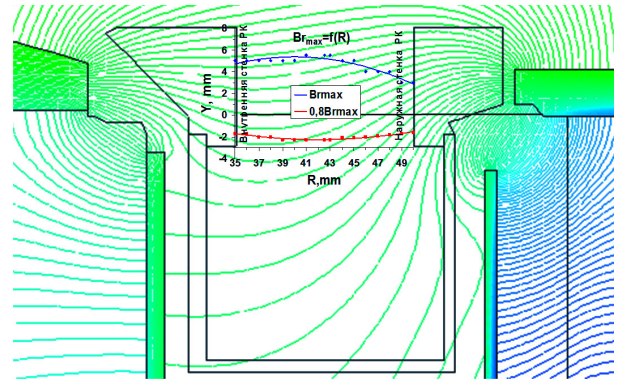
Для прототипа двигателя ПлаС-40 по результатам магнитных расчетов наименьшее значение B_{rmax} составило 230 Гс.

Серединный диаметр УК прототипа двигателя ПлаС-40 составляет 40 мм. За начало отсчета ($z = 0$) принята внутренняя посадочная плоскость наружного магнитного полюса, а срез РК вынесен относительно него на $z = 4,5$ мм.

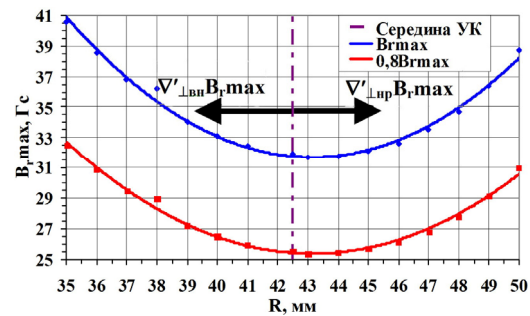
Особенностью конструкции МС прототипа двигателя ПлаС-40 является то, что он выполнен с полым магнитным анодом, позволяющим исключить из конструкции магнитные экраны, которые широко используются в СПД. По периферии такой МС размещаются три наружных катушки намагничивания, имеющих плоскую вытянутую форму, сориентированные своим наибольшим габаритным размером тангенциально РК.

В прототипе двигателя ПлаС-40 несовпадение расположения минимального значения B_{rmax} с серединой УК составляет 1,5 мм со смещением в сторону наружного магнитного полюса (различие составляет 4,1%) (рис. 5). Параметр «физической» симметричности $\Psi = 0,24$, полученный при $B_{rmaxвн} = 520,0$ Гс ($R_{вн} = 15$ мм), $B_{rmaxнр} = 305,0$ Гс ($R_{нр} = 25$ мм), $B_{rmaxпр} = 230,0$ Гс ($R_{пр} = 21,5$ мм), $\nabla'_{\perp вн} B_{rmax} = 55,2$ Гс/мм; $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax} = 13$ Гс/мм (при смене знака параметра, т. е. двух слагаемых $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax1} = -9,3$ Гс/мм и $\nabla'_{\perp нр} B_{rmax2} = 22,3$ Гс/мм).

Неравенство $\nabla_{\perp вн} B_{rmax}$ и $\nabla_{\perp нр} B_{rmax}$ приводит к различной степени замагниченности электронов вблизи стенок канала и, как следствие, к неравномерности концентрации электронов по ширине канала, а соответственно, и к неравномерности распределения электрического потенциала, что в конечном итоге влияет на преимущественное истечение ионного потока, которое в значительной степени зависит от действия градиента электронного давления в УК [10].

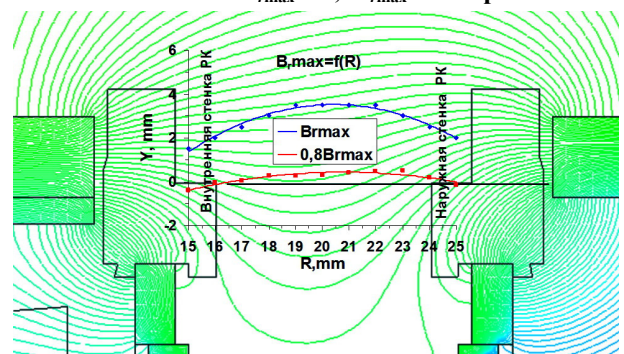


а

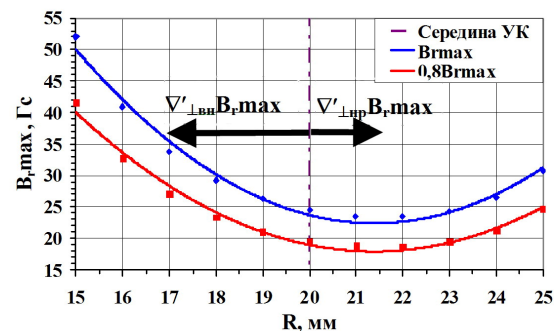


б

Рис. 4. Топология магнитного поля в межполюсном промежутке двигателя SPT-1: а – область действия максимальных магнитных полей по ширине УК; б – зависимости B_{rmax} и $0,8B_{rmax}$ по ширине УК



а



б

Рис. 5. Топология магнитного поля в межполюсном промежутке прототипа двигателя ПлаС-40: а – область действия максимальных магнитных полей по ширине канала; б – зависимости B_{rmax} и $0,8B_{rmax}$ по ширине канала

Из полученных данных анализа конструкций и проведенных исследовательских испытаний различных двигателей следует, что «физическая» асимметричность магнитной линзы, очевидно, может быть скомпенсирована за счет ее геометрической ориентации относительно УК. Следовательно понятие симметричность магнитной линзы является *комплексным параметром*, который зависит как от баланса ее собственных физических параметров по ширине канала, так и от ее геометрического расположения (ее ориентации в пространстве).

Так при параметрических испытаниях прототипа ПлаС-40 при попытке оптимизации токов в катушках намагничивания была обнаружена следующая особенность, выраженная в том, что высокий уровень параметров двигателя реализовывался при различных комбинациях токов в наружных и внутренних катушках, значения которых приведены в табл. 3. Т. е. при уменьшении токов в одной группе катушек приходилось увеличивать ток в другой группе. В последней колонке табл. 3 указано суммарное количество ампер-витков катушек намагничивания МС ($I_{кат\Omega}$).

Увеличение токов во внутренней катушке приводило к увеличению суммарного количества ампер-витков из-за магнитного насыщения ее сердечника. Для различных сочетаний токов в катушках намагничивания, согласно данным табл. 3, магнитное поле в контрольной точке измерений (по середине УК и в плоскости среза РК) оставалось постоянным – 185 Гс. Возмож-

ность варьирования и окончательного выбора различных сочетаний токов дает возможность оптимизации конструкции МС, например, по ее массе.

Кроме того, для определения влияния изменения токов намагничивания на интегральные параметры двигателя (относительно оптимальных значений) в одной группе катушек ток поддерживался оптимальным, а в другой варьировался. Такие измерения были выполнены на трех режимах:

- 1) $U_p = 200$ В, $G_a = 1,28$ мг/с, $I_{кв} = 2,20$ А и $I_{кн} = var$, $I_{кн} = 0,95$ А и $I_{кв} = var$;
- 2) $U_p = 300$ В, $G_a = 1,28$ мг/с, $I_{кв} = 2,65$ А и $I_{кн} = var$, $I_{кн} = 1,22$ А и $I_{кв} = var$;
- 3) $U_p = 200$ В, $G_a = 1,78$ мг/с, $I_{кв} = 2,13$ А и $I_{кн} = var$, $I_{кн} = 1,00$ А и $I_{кв} = var$.

В окрестности выбранных точек наблюдаются колебания токов намагничивания, однако, при этом ток разряда изменяется незначительно. Т. е. у МС с магнитным анодом имеются более существенные запасы по устойчивости и стабильности основных параметров к изменениям магнитного поля. Выбранные токи намагничивания обеспечивают не только минимальное значение разрядного тока, но и максимальный анодный КПД.

Достигнутый результат обеспечения требуемого уровня параметров двигателя при различных сочетаниях токов в наружных и внутренних катушках наиболее вероятно обусловлен заложенным в конструкции достаточным запасом мощности источников намагничивания.

Таблица 3

Параметры при различных оптимизированных сочетаниях токов в катушках намагничивания прототипа ПлаС-40

I_p , А	U_p , В	F , гс	$\sim I_p$, А	$\sim U_p$, В	$I_{кн}$, А	$I_{кв}$, А	I_i , А	G_a , мг/с	G_k , мг/с	КПД _а , %	$P_{уд}$, с	C_t , Вт/гс	$I_{кат\Omega}$, А·виток
1,51	200	2,14	0,22	1,55	0,50	2,80	1,23	1,78	0,13	41,0	1202	141,1	591
1,51	200	2,16	0,07	1,55	1,00	2,10	1,24	1,78	0,13	41,8	1213	139,8	552
1,50	200	2,15	0,12	1,55	1,50	1,58	1,23	1,78	0,13	41,7	1208	139,5	542
1,49	200	2,12	0,13	1,45	2,00	0,90	1,24	1,78	0,13	40,8	1191	140,6	510
1,49	200	2,10	0,11	1,45	2,50	0,27	1,24	1,78	0,13	40,0	1180	141,9	483

Примечание: I_p – ток разряда; U_p – напряжение разряда; F – тяга двигателя; $\sim I_p$ – среднеквадратичная амплитуда тока разряда; $\sim U_p$ – среднеквадратичная амплитуда напряжения разряда; $I_{кн}$ – ток наружной катушки намагничивания; $I_{кв}$ – ток внутренней катушки намагничивания; I_i – ионный ток; G_a – анодный расход; G_k – катодный расход; КПД_а – анодный коэффициент полезного действия; $P_{уд}$ – удельный импульс тяги двигателя; C_t – цена тяги; $I_{кат\Omega}$ – намагничивающая сила.

Известно также, что повышению фокусировки ускоряемого потока плазмы способствует обеспечение большей скорости нарастания индукции магнитного поля в области больших магнитных полей при увеличении кривизны силовых линий магнитной линзы, стремясь в идеале к бесконечности [4]. Для сравнительного анализа определим скорость нарастания $B_{r\max}$ по середине УК для моделей различных разновидностей двигателей: стационарного плазменного и гибридного, но одного типоразмера по формуле (4):

$$v_{B_r} = \frac{B_{r_i} - B_{r_{i-1}}}{R_i - R_{i-1}}, \quad (4)$$

где B_{r_i} – значение радиальной компоненты магнитной индукции в координате R_i ; $B_{r_{i-1}}$ – значение радиальной компоненты магнитной индукции в координате R_{i-1} .

Проведенные расчеты магнитных полей показывают, что для двигателя СПД-100 на участке в области действия больших магнитных полей, ограниченного координатами от -5 до 0 мм, скорость нарастания $B_{r\max}$ составляет $v_B = 7,91$ Гс/мм, тогда как для высоковольтной модели гибридного двигателя SPT-1 скорость нарастания на том же участке увеличивается до $v_B = 13,73$ Гс/мм, что предпочтительней.

Следует также отметить, что при прочих равных условиях и, что особенно важно, при неизменном магнитном поле, при переходе с режимов работы на разрядном напряжении 300 В на режимы повышенных разрядных напряжений $750 - 800$ В зона износа стенок РК при этом вдвигается вглубь канала на $1,2 - 1,5$ мм. Это свидетельствует о соответствующем перемещении зон ионизации и ускорения плазмы. Очевидно, что с увеличением площади эрозии – площади подверженной бомбардировке ускоренными ионами, при работе на высоковольтных режимах резко возрастает суммарная энергия, выделяемая на стенках канала, избыточность которой может приводить к критичным локальным разогревам участков стенок канала и даже перегревам, что существенно снижает эффективность работы ЭРД в целом. В качестве мероприятия по снижению вероятности перегревов стенок канала представляется уменьшение площади поясков эрозии за счет выноса зон ионизации и ускорения, а соответственно, и магнитной линзы по направлению к срезу РК.

Результаты исследований структуры магнитного поля в УК ЭРД и локальной топологии силовых линий магнитных потоков в межполюсном промежутке, определяющих фокусирующие свойства магнитной линзы путем начального определения фронтального распределения максимальной радиальной составляющей индукции магнитного поля $B_{r\max}$ по ширине УК, показали, что предельная (наименьшая) величина $B_{r\max}$ действует на некотором удалении от середины УК, как правило, со смещением на некоторую величину за счет действия более мощного магнитного потока генерируемого внутренним источником намагничивания в сторону наружного магнитного полюса, которая зависит в основном от соотношения мощностей внутреннего и наружного источников намагничиваний.

Таким образом, анализ о достигаемом уровне магнитного поля и соответствующих ему магнитных потоков, определяющих фокусирующие свойства магнитной линзы, по текущей промежуточной величине магнитного поля, действующего по середине УК, является недостаточно точным. Для минимизации погрешности необходимо определять предельное (наименьшее) значение $B_{r\max}$ и его месторасположение в УК, определяющего ось симметрии магнитной линзы.

Литература

1. Политехнический словарь / Редкол.: А.Ю. Ишлинский (гл. ред.) и др. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Советская энциклопедия, 1989. – 656 с.: ил.
2. Белан Н.В. Стационарные плазменные двигатели: учеб. пособие / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский [и др.]. – Харьков: ХАИ им. Н.Е.Жуковского, 1989. – 316 с.
3. Ермошкин Ю.М. Основы теории и расчета электрореактивных двигателей и двигательных установок: учеб. пособие / Ю.М. Ермошкин; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. – Красноярск, 2003. – 160 с.
4. Современное состояние физических исследований в ускорителях с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения / А.И. Бугрова, В.П. Ким // Плазменные ускорители и ионные инжекторы. – М.: Наука, 1984. – С. 107.
5. A High Specific Impulse Two-Stage Hall Thruster with Plasma Lens Focusing / Richard R. Hofer, Peter Y. Peterson, Alec D. Gallimore // IEPC-01-036, 27th International Electric Propulsion Conference, Pasadena, CA, 2001.
6. Effects of Channel Wall Material on Performance and Plasma Characteristics of Hall Thrusters / Hirokazu

Tahara, Katsumi Imanaka, Seiro Yuge // IEPC-2005-015, 29th International Electric Propulsion Conference, Princeton University, 2005.

7. SPT100 Life Test with Single Cathode Up to Total Impulse Two Million Nsec / R. Gnizdor, K. Kozubsky, A. Koryakin, N. Maslennikov, S. Pridannikov, M. Day // AIAA 98-3790, 34th Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cleveland, Oc, 1998.

8. The PPS®1350 qualification demonstration 7500h on ground, about 5000h in flight / Frédéric R. Marchandise, Joël Biron, Marc Gambon, Nicolas Cornu, Frank Damon,

Denis Estublier // IEPC-2005-209, 29th IEPC International Electric Propulsion Conference, Princeton University, 2005.

9. The PPS®1350 Qualification demonstration 10500hrs on ground, 5000hrs in flight / Marchandise, Nicolas Cornu, Denis Estublier, Émilie Coulaud // AIAA 2007-5197, 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Cincinnati, OH, 2007.

10. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику / А.И. Морозов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 616 с.

Поступила в редакцию 17.12.2010

Владимир Васильевич Гопанчук, ведущий конструктор, т. 8 (4012) 55-66-62.
Мира Юрьевна Потапенко, аспирант, инженер, т. 8 (4012) 55-66-20, e-mail: mira-world@yandex.ru.