

ОПТИМИЗАЦИЯ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СПД-70 ПУТЕМ МАКСИМИЗАЦИИ ГРАДИЕНТА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Введение

Интегральные характеристики стационарного плазменного двигателя (тяга, удельный импульс, КПД, ресурс) в существенной степени зависят от величины индукции магнитного поля и ее распределения в ускорительном канале (УК) двигателя [1 – 2].

Сложные физические процессы, протекающие в УК стационарного плазменного двигателя (СПД), а также трудности исследования влияния на них магнитного поля определили тот факт, что на сегодняшний день отсутствует окончательный и «наилучший» метод позволяющий оптимизировать магнитную систему двигателя и получить наилучшие характеристики двигателя.

Целью данной работы является оптимизация магнитной системы СПД-70 по критериям, сформулированным из анализа связей параметров магнитного поля и свойств зоны ионизации и ускорения (ЗИУ) [3 – 4]. Особенности оптимизации являются, во-первых, использование нескольких критериев, а во-вторых, учет свойств ЗИУ по ширине УК.

Критерии оптимизации

В работе [4] обнаружены следующие связи свойств ЗИУ с параметрами магнитного поля:

– на границе начала ЗИУ по ширине УК величина радиальной составляющей индукции магнитного поля численно равна $0,8 \cdot Br_{max}$, где Br_{max} – максимальное значение радиальной составляющей индукции магнитного поля в соответствующем сечении по ширине УК;

– в первом приближении по ширине УК продольная протяженность ЗИУ $L_{зuy}$ обратно пропорциональна максимальным значениям продольного градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля dBr/dz_{max} , т. е. $L_{зuy}(R) \propto 1/dBr/dz_{max}(R)$;

– в первом приближении по ширине УК напряженность электрического поля прямо пропорциональна dBr/dz_{max} , т. е. $E_z(R) \propto dBr/dz_{max}(R)$.

На основании приведенных выше связей свойств ЗИУ с параметрами магнитного поля предлагается следующий критерий оптимизации магнитной системы двигателя – максимизация dBr/dz_{max} в УК.

Распределение dBr/dz_{max} по ширине УК не является однородным, поэтому в общем виде необходимо максимизировать dBr/dz_{max} в каждом сечении по ширине канала (рис. 1). Расстояние между сечениями Δr в пределе стремится к нулю, поэтому функция цели имеет вид

$$f_u = \int_{R=21}^{R=35} \frac{dBr}{dz_{max}} (R) dR \rightarrow \max. \quad (1)$$

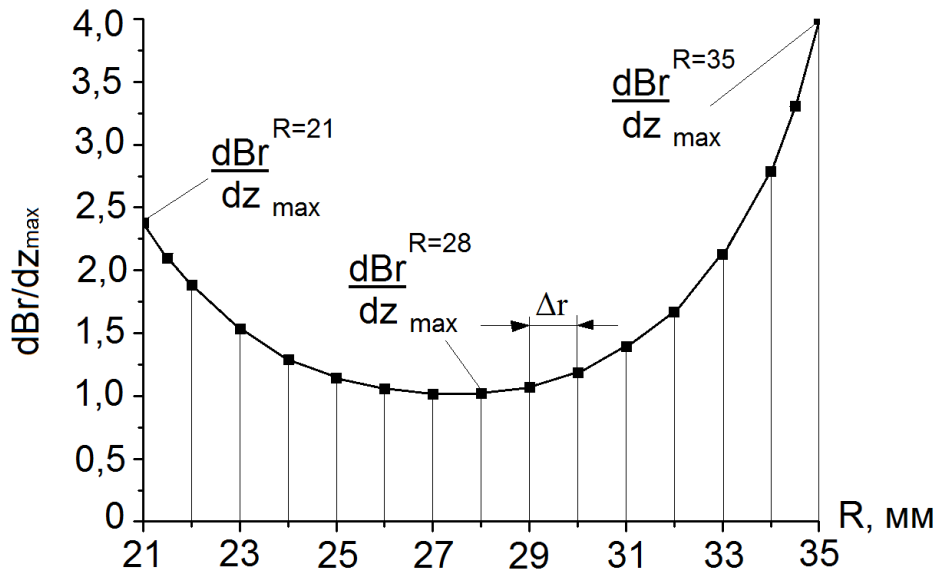


Рисунок 1 – Распределения dBr/dz_{max} по ширине УК СПД

Интеграл (1) решается численно методом трапеций. После преобразований функция цели имеет вид

$$f_u = \frac{dBr^{R=21}}{dz_{max}} + 2 \cdot \frac{dBr^{R=28}}{dz_{max}} + \frac{dBr^{R=35}}{dz_{max}} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $\frac{dBr^{R=28}}{dz_{max}}$, $\frac{dBr^{R=21}}{dz_{max}}$, $\frac{dBr^{R=35}}{dz_{max}}$ – максимальные значения продольного градиента радиальной составляющей индукции магнитного поля вдоль срединной линии УК ($R = 28$), вдоль внутренней ($R = 21$) и наружной ($R = 35$) стенок УК соответственно.

В дополнение к функции цели (2) были добавлены следующие критерии и ограничения:

- критерий максимального смещения границы начала ЗИУ в направлении выхода из УК:

$$z_{0,8Br_{max}}^{R=21} + 2z_{0,8Br_{max}}^{R=28} + z_{0,8Br_{max}}^{R=35} \rightarrow \max, \quad (3)$$

где $z_{0,8Br_{max}}^{R=21}$, $z_{0,8Br_{max}}^{R=28}$, $z_{0,8Br_{max}}^{R=35}$ – продольные координаты положения точек с величиной индукции магнитного поля $0,8 \cdot Br_{max}$, определяющие границу начала ЗИУ вдоль внутренней, наружной стенок и срединной линии УК соответственно;

– критерий выравнивания границы начала ЗИУ вдоль внутренней и наружной стенок УК:

$$\left| z_{0,8Br_{max}}^{R=21} - z_{0,8Br_{max}}^{R=35} \right| \rightarrow \min; \quad (4)$$

– критерий симметричности электростатической линзы относительно срединной линии УК:

$$\left| \frac{dBr^{R=21}}{dz_{max}} - \frac{dBr^{R=35}}{dz_{max}} \right| \rightarrow \min; \quad (5)$$

– ограничение на количество ампер-витков

$$nI < 1,3 \cdot n_{\text{НОМИН}} \cdot I_{\text{НОМИН}}, \quad (6)$$

где $n_{\text{НОМИН}} \cdot I_{\text{НОМИН}}$ – количество ампер-витков в катушках магнитной системы на номинальном режиме работы двигателя, а число 1,3 определено конструкцией двигателя и максимально допустимым увеличением количества ампер-витков без изменения размеров двигателя;

– ограничение на максимальную величину индукции МП Br_{max} на срединной линии УК

$$Br_{max} = 15,84 \pm 0,01 \text{ мТл}; \quad (7)$$

– ограничение на максимальное значение индукции магнитного поля в элементах магнитной системы (условие отсутствия магнитного насыщения магнитопроводов) [5, 6]

$$B_{max} < 2,2 \text{ Тл (для сплава 49КФ)}; \quad (8)$$

$$B_{max} < 1,8 \text{ Тл (для стали 10880)}; \quad (8a)$$

– ограничение на максимальные механические напряжения, возникающие в элементах конструкции магнитной системы при воздействии динамических нагрузок во время старта и полета на участке выведения ракеты-носителя (условие обеспечения запаса прочности) [7]

$$f = \frac{\sigma_{\text{пред}}}{\sigma^p} > 1,5 \quad (9)$$

где $\sigma_{\text{пред}}$ – предельное напряжение; σ^p – эквивалентное расчетное напряжение.

Отсевивание малозначимых факторов

Составляющие из выражений (2) – (6) зависят от геометрических параметров магнитной системы. В целях отсеивания малозначимых геометрических параметров магнитной системы проводились предварительные расчеты в пакете численного моделирования Ansoft Maxwell 14.0 [8, 9]. Были отобраны геометрические параметры магнитной системы (рис. 2), которые могут иметь влияние на распределение параметров магнитного поля в УК двигателя, и методом последовательного перебора определено их влияние на составляющие из (2) – (6). При расчетах значение Br_{max} на срединной линии выдерживалось постоянным.

Анализ полученных результатов (рис. 3) показал, что влияние

большинства размеров на dBr/dz_{max} , $Z_{0,8Br_{max}}^R$ и nl является незначительным, по крайней мере при отсутствии насыщения магнитопроводов. Исключение составляют размеры, непосредственно формирующие магнитный поток через магнитные экраны и полюсные наконечники. К ним относятся толщины полюсных наконечников (A9, A10), диаметры полюсных наконечников (G, F), зазоры между магнитными экранами и полюсными наконечниками (B, C), а также диаметры расположения магнитных экранов (D, E).

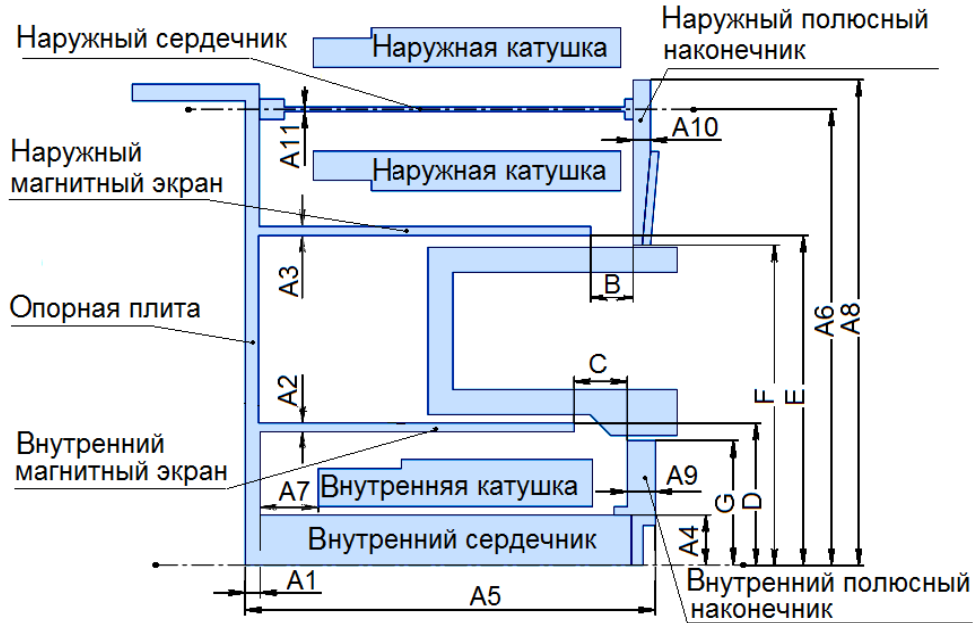


Рисунок 2 – Эскиз магнитной системы с обозначением основных элементов и параметров

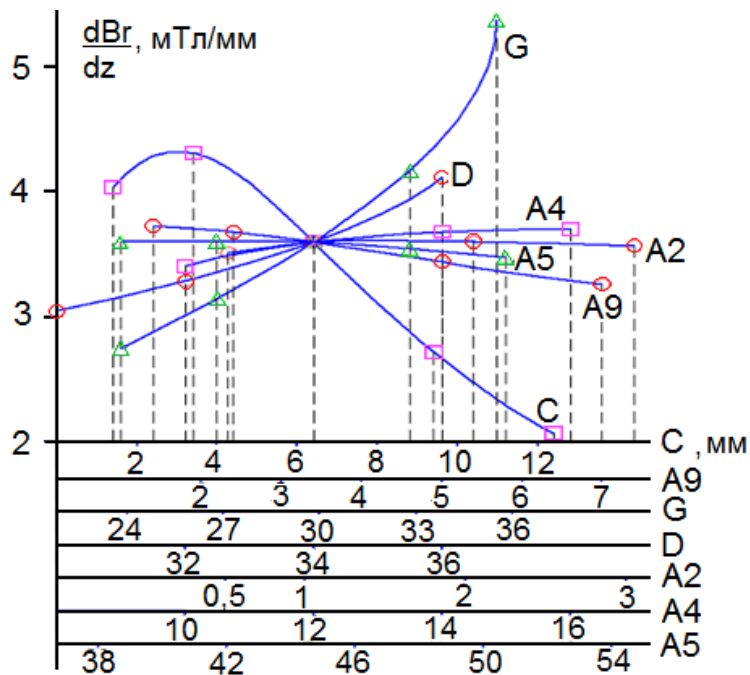


Рисунок 3 – График зависимости dBr/dz_{max} вдоль внутренней стенки УК от геометрических параметров элементов магнитной системы

Построение полиномиальных зависимостей

Для получения зависимостей составляющих выражений (2) – (6) от основных геометрических параметров магнитной системы двигателя был проведен факторный эксперимент. Факторы, варьируемые в ходе эксперимента:

- толщина внутреннего полюсного наконечника (ПН) – X_1 ;
- толщина наружного ПН – X_2 ;
- наружный диаметр внутреннего ПН – X_3 ;
- внутренний диаметр наружного ПН – X_4 ;
- зазор между внутренним магнитным экраном (МЭ) и внутренним ПН – X_5 ;
- зазор между наружным МЭ и наружным ПН – X_6 ;
- диаметр расположения внутреннего МЭ – X_7 ;
- диаметр расположения наружного МЭ – X_8 .

Интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1. Здесь X_i – факторы варьирования, x_i – уровни факторов в кодированном виде. Был применен ортогональный центрально-композиционный план (ОЦКП) для $n = 8$ значимых факторов [9]. Общее число опытов для плана второго порядка составило $N = 2^n + 2n + 1 = 273$.

Таблица 1 – Факторы и факторные пространства

$X_i \backslash x_i$	-2,045	-1	0	+1	+2,045
X_1	1,455	2,5	3,5	4,5	5,545
X_2	1,455	2,5	3,5	4,5	5,545
X_3	25,71	27,8	29,8	31,8	33,89
X_4	74,4325	76	77,5	79	80,5675
X_5	2,9325	4,5	6	7,5	9,0675
X_6	2,9325	4,5	6	7,5	9,0675
X_7	29,91	32	34	36	38,09
X_8	74,71	76,8	78,8	80,8	82,89

Были получены полиномиальные 2-й степени уравнения, общий вид которых

$$y(x_1, \dots, x_8) = a_0 + \sum_{i=1}^8 a_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^8 a_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^8 a_{ii} x_i^2, \quad (10)$$

где a_i – коэффициенты регрессии полиномиального выражения.

Коэффициенты регрессии рассчитывали по формулам

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} \bar{y}_j}{\sum_{j=1}^N x_{ij}^2}; & a_{iu} &= \frac{\sum_{\substack{j=1 \\ u>i}}^N x_{ij} x_{uj} \bar{y}_j}{\sum_{j=1}^N (x_{ij} x_{uj})^2}; \\ a_{ii} &= \frac{\sum_{j=1}^N (x_{ij}^2 - \beta) \bar{y}_j}{\sum_{j=1}^N (x_{ij}^2 - \beta)^2}; & a_0 &= \frac{\sum_{j=1}^N \bar{y}_j}{N} - \beta \sum_{i=1}^n b_{ii}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где x_{ij} – уровень i -го фактора в j -м опыте; \bar{y}_j – значение функции отклика в j -м опыте; $\beta = 0,97$ – коэффициент для $n = 8$ факторов в ОЦКП.

В результате вычислительного эксперимента были получены следующие полиномиальные зависимости:

$$\begin{aligned} dBr^{R=21}/dz_{max}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) &= 3,617 - 0,083x_1 - \\ &- 0,044x_2 + 0,404x_3 + 0,11x_4 - 0,433x_5 - 0,056x_6 + 0,42x_7 - \\ &- 0,023x_8 - 0,0057x_1^2 + 0,01x_2^2 + 0,042x_3^2 + 0,0027x_4^2 - \\ &- 0,028x_5^2 + 0,0087x_6^2 + 0,133x_7^2 + 0,005x_8^2 - 0,042x_1x_3 - \\ &- 0,0049x_1x_4 - 0,011x_1x_5 + 0,0051x_1x_6 - 0,0085x_1x_7 + \\ &+ 0,0061x_2x_5 + 0,0035x_2x_6 - 0,012x_2x_7 + 0,0054x_3x_4 - \\ &- 0,16x_3x_5 + 0,006x_3x_7 - 0,01x_4x_5 - 0,0075x_4x_6 + \\ &+ 0,022x_4x_7 + 0,0094x_5x_6 - 0,112x_5x_7 + 0,0032x_5x_8 - \\ &- 0,014x_6x_7 + 0,0057x_6x_8 - 0,006x_7x_8; \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
dBr^{R=28} / dz_{max} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = & 1,25 - \\
& -0,008x_1 - 0,0059x_2 + 0,0084x_3 - 0,015x_4 - 0,024x_5 - \\
& -0,016x_6 + 0,019x_7 - 0,034x_8 + 0,0027x_1^2 + 0,0039x_2^2 + \\
& +0,005x_3^2 + 0,0039x_4^2 - 0,0021x_5^2 - 0,0033x_6^2 + \\
& +0,0039x_7^2 + 0,005x_8^2 - 0,0011x_1x_3 - 0,0009x_1x_5 - & (13) \\
& -0,001x_1x_7 - 0,0018x_1x_8 + 0,0007x_2x_4 + 0,0017x_3x_4 - \\
& -0,0018x_3x_5 + 0,0017x_3x_6 + 0,005x_3x_7 + 0,0045x_3x_8 + \\
& +0,0032x_4x_6 + 0,0016x_4x_7 + 0,0014x_4x_8 + 0,0082x_5x_6 + \\
& +0,0016x_5x_7 + 0,0046x_5x_8 - 0,002x_6x_7 - 0,0007x_7x_8;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
dBr^{R=35} / dz_{max} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = & 3.329 - \\
& -0.121x_1 - 0,102x_2 - 0,25x_3 - 0,35x_4 - 0,12x_5 - 0,7x_6 - \\
& -0,017x_7 - 0,352x_8 + 0,014x_1^2 + 0,0035x_2^2 + 0,11x_4^2 + \\
& +0,018x_5^2 + 0,044x_6^2 + 0,11x_8^2 + 0,0076x_1x_3 + 0,096x_1x_5 + \\
& +0,034x_1x_6 + 0,021x_1x_8 + 0,0087x_2x_3 + 0,034x_2x_4 + & (14) \\
& +0,0075x_2x_5 + 0,014x_2x_6 + 0,005x_2x_8 + 0,0099x_3x_4 + \\
& +0,0085x_3x_5 + 0,061x_3x_6 + 0,0093x_3x_7 + 0,037x_3x_8 + \\
& +0,135x_4x_6 - 0,074x_4x_8 + 0,031x_5x_6 + 0,0045x_5x_7 + \\
& +0,018x_5x_8 + 0,0045x_6x_7 + 0,186x_6x_8;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{0.8Br_{max}}^{R=21} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = & -9,764 + 0,063x_1 + \\
& +0,278x_3 - 1,034a_5x_5 - 0,51a_7x_7 + 0,12x_3^2 - 0,043x_7^2 - & (15) \\
& -0,045x_1x_7 + 0,138x_3x_5 - 0,145x_3x_7 - 0,31x_5x_7;
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{0.8Br_{max}}^{R=28} (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = & -9,686 + 0,101x_1 + \\
& +0,068x_2 - 0,348x_5 - 0,418x_6 + 0,047x_7 - 0,128x_8 + & (16) \\
& +0,047x_3x_5 - 0,055x_5x_7 + 0,084x_6x_8;
\end{aligned}$$

$$Z_{0,8Br_{max}}^{R=35}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = -8,151 - 0,796x_4 - \\ -0,469a_6x_6 + 0,39x_8 + 0,099x_4^2 + 0,213x_6^2 - 0,122x_8^2 - \\ -0,503x_4x_6 + 0,224x_4x_8 + 0,171x_6x_8; \quad (17)$$

$$K_{nl}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8) = 0,979 - 0,044x_1 - \\ -0,018x_2 - 0,085x_3 + 0,045x_4 - 0,038x_5 - \\ -0,017x_6 - 0,0068x_7 + 0,0079x_1^2 + 0,0055x_2^2 + \\ +0,0031x_3^2 + 0,0031x_4^2 + 0,0091x_5^2 + 0,0055x_6^2 + \\ +0,0031x_8^2 - 0,0028x_1x_4 + 0,0031x_1x_5 - \\ +0,0044x_3x_4 + 0,0027x_3x_5 - 0,0037a_{45}x_4x_5 - 0,0035x_4x_6. \quad (18)$$

В выражениях (12) – (18) кодированные факторы имеют вид: $x_1 = A9 - 3,5$, $x_2 = A10 - 3,5$, $x_3 = 0,5G - 14,9$, $x_4 = 0,67F - 51,67$, $x_5 = 0,67C - 4$, $x_6 = 0,67B - 4$, $x_7 = 0,5D - 17$, $x_8 = 0,5E - 39,4$.

Средняя погрешность аппроксимации $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Y - Y_i}{Y}$ между опытными значениями Y и предсказанными с помощью (10) значениями Y_i составила: для $\frac{dBr^{R=21}}{dz_{max}} - 4,4 \%$; $\frac{dBr^{R=28}}{dz_{max}} - 0,01 \%$; $\frac{dBr^{R=35}}{dz_{max}} - 6,2 \%$; $Z_{0,8Br_{max}}^{R=21} - 3,1 \%$; $Z_{0,8Br_{max}}^{R=28} - 1,0 \%$; $Z_{0,8Br_{max}}^{R=35} - 4,4 \%$; $nl - 0,85 \%$.

Решение задачи оптимизации

Задача с функциями (2) – (5) и ограничениями (6) – (9) является задачей многокритериальной оптимизации. Ее решение было получено после перехода к однокритериальной оптимизации по методу главного критерия [10]. Суть метода главного критерия заключается в том, что из нескольких критериев выбирается основной (главный), а остальные целевые функции переводятся в разряд ограничений. При этом вводятся контрольные показатели \tilde{f}_k , относительно которых по всем критериям должны быть достигнуты значения не меньше заданных значений \tilde{f}_k . Главным критерием был выбран критерий (2).

В табл. 2 приведены значения контрольных показателей для функций (3) – (5). Контрольные показатели для критериев (3), (4) обусловле-

ны погрешностью аппроксимации между опытными и предсказанными с помощью (9 – 10) значениями функции отклика. \tilde{f}_k для критерия (5) получено экспериментально. Было определено, что в УК возможно смещение ЗИУ в направлении среза без уменьшения функции цели до определенного момента. На рис. 4 показано, что при значениях $\tilde{f}_k > -15$ мм происходит резкое снижение f_u , а до значения $\tilde{f}_k = -15$ мм возможно смещение ЗИУ без уменьшения значения f_u .

Таблица 2 – Контрольные показатели

Критерий	\tilde{f}_k
$\left Z_{0,8Br_{max}}^{R=21} - Z_{0,8Br_{max}}^{R=35} \right \rightarrow \min$	0,1 мм
$\left \frac{dBr}{dz}_{max}^{R=21} - \frac{dBr}{dz}_{max}^{R=35} \right \rightarrow \min$	0,2 мТл/мм
$Z_{0,8Br_{max}}^{R=21} + 2Z_{0,8Br_{max}}^{R=28} + Z_{0,8Br_{max}}^{R=35} \rightarrow \max$	-15,0 мм

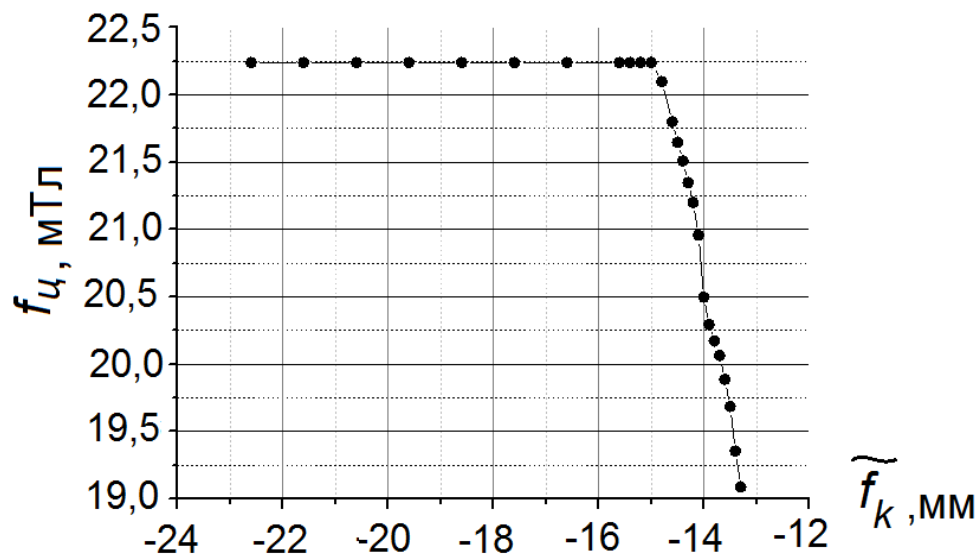


Рисунок 4 – График зависимости f_u (2) от \tilde{f}_k критерия (5)

Решение системы уравнений (2) – (9) получено квази-Ньютоновским методом [11]. Решение в кодированном виде следующее: $x_1 = -1$; $x_2 = -1$; $x_3 = 2,0$; $x_4 = 0,64$; $x_5 = -2$; $x_6 = -1,93$; $x_7 = -0,08$; $x_8 = -2$.

Сравнение результатов расчета магнитного поля в УК двигателя до и после оптимизации показали следующее:

1) увеличение значений dBr/dz_{max} во всех сечениях по ширине УК, что согласно обнаруженным связям свойств ЗИУ с распределением параметров магнитного поля, должно привести к увеличению напряженности электрического поля в УК [4] и соответственному улучшению интегральных характеристик двигателя;

2) снижение разницы значений dBr/dz_{max} между внутренней и наружной стенками УК с 14,2 % до 2,9%, что должно привести к выравниванию оси электростатической линзы в УК вдоль срединной линии УК, уменьшению угла расходимости струи двигателя и соответственному улучшению интегральных характеристик двигателя;

3) снижение разницы начала ЗИУ вдоль стенок УК с 3 мм до 0,5 мм, что должно привести к более равномерной эрозии внутренней и наружной стенок УК;

4) смещение ЗИУ в среднем на 2 мм в направлении выхода из УК, что должно привести к снижению потерь ускоренных ионов на стенках УК и соответственно увеличению ресурса двигателя, а также к сокращению протяженности ЗИУ.

Исследование интегральных характеристик СПД-70 с оптимизированной магнитной системой

В целях проверки результативности проведенной оптимизации магнитной системы была изготовлена новая модель двигателя, получившая название СПД-М70М2, и проведено исследование ее интегральных характеристик. В табл. 3 приведены измеренные и расчетные характеристики двигателей до оптимизации (СПД-70) и после оптимизации (СПД-М70М2) с указанием абсолютных погрешностей.

В качестве контрольной точки для сравнения характеристик был выбран номинальный режим работы по массовому расходу газа $\dot{m}_\Sigma = 2,5$ мг/с и разрядному напряжению $U_d = 300$ В.

Таблица 3 – Характеристики СПД до и после оптимизации

Двигатель	СПД-70	СПД-М70М2	$\epsilon_{отн}, \%$
Характеристика			
Мощность, Вт	660		2,4
Разрядное напряжение, В	300		0,5
Расход газа, мг/с	2,5		0,8
Тяга, мН	36,4	40,2	3
Удельный импульс, м/с	14600	16100	3,2
Тяговый КПД, %	40	49	6,2

Анализ характеристик двигателя до и после оптимизации магнитной системы показывает, что на номинальном режиме работы у оптими-

зированной двигателя интегральные характеристики выше: тяговый КПД на 9%, удельный импульс на 1500 м/с. При потребляемой электрической мощности 660 Вт и массовом расходе 2,5 мг/с тяга двигателя с оптимизированной магнитной системой на 10 % выше.

Зондовая диагностика струи двигателя показала, что у оптимизированного двигателя на больших углах раскрытия струи плотность ионного тока уменьшилась, а в приосевой области увеличилась. Это свидетельствует об улучшении фокусировки струи двигателя. Расчеты показали, что полуугол, в котором содержится 90 % ионного тока, уменьшился с 42° до 26°.

Исследование функции распределения ионов по энергии в струе двигателя показали уменьшение доли ионов с энергиями 50...200 эВ и увеличение доли ионов с энергией ≈ 250 эВ. При разрядном напряжении 300 В это является результатом увеличения числа ионов, «проходящих» полную приложенную разницу электрического потенциала, что стало возможным благодаря уменьшению протяженности ЗИУ у двигателя с оптимизированной магнитной системой.

Ресурсные испытания двигателей на временной базе ≈ 50 часов показали изменения в профиле эрозии выходных кромок изолятора ускорительного канала. Ширина поясков эрозии на внутренней кромке сократилась на 3 мм, а на наружной кромке – на 2 мм. Сокращение ширины поясков эрозии явилось следствием выдвигания ЗИУ в направлении среза УК, обеспеченное введением в задачу оптимизации критерия (3). Кроме того произошло выравнивание ширины поясков эрозии на внутренней и наружной кромках изолятора как результат выполнения критерия (4).

Выводы

1. На основании обнаруженных связей свойств зоны ионизации и ускорения с параметрами магнитного поля предложена система критериев оптимизации магнитной системы СПД. В качестве главной функции цели выбрана максимизация $dBr/dz_{max}(R)$. Вторичные критерии добавлены для смещения зоны ионизации и ускорения в направлении среза ускорительного канала, выравнивания границы начала зоны ионизации и ускорения вдоль стенок ускорительного канала и выравнивания симметричности электростатической линзы.

4. Проведена оптимизация магнитной системы двигателя по предложенной системе критериев. Для этого были отсеяны малозначимые геометрические параметры магнитной системы и методом факторного планирования получены полиномиальные уравнения, связывающие основные геометрические параметры магнитной системы с параметрами магнитного поля в ускорительном канале СПД. Решение оптимизацион-

ной задачи с целевой функцией и ограничениями получено квази-Ньютоновским методом.

5. Испытания СПД с оптимизированной магнитной системой по предложенной системе критериев показали увеличение тягового КПД с 40 до 49 %, удельного импульса с 14600 до 16100 м/с при потребляемой электрической мощности 660 Вт.

Список использованных источников

1. Blinov, N. V. Experimental Investigation of Magnetic Field Topology Influence on Structure of Accelerating Layer and Performance of Hall Thruster [Электронный ресурс] / N. V. Blinov, O. A. Gorshkov, A. A. Shagayda // 29th International Electric Propulsion Conference. – 2005. – IEPC-2005-033. – P. 1-10. Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_988-2007/2005_index/033.pdf. – 1.04.2016 г.

2. Gawron, D. Influence of magnetic field and discharge voltage on the acceleration layer features in a Hall effect thruster [Электронный ресурс] / D. Gawron, S. Mazouffre, N. Sadeghi, A. Heron // Plasma Sources Science and Technology. – 2008. Vol. 17. – № 2. – P. 1-10. Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0963-0252/17/2/025001>. – 1.04.2016 г.

3. Титов, М. Ю. Корреляция параметров плазмы с магнитным полем в канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян, Н. Б. Чупрына // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 7 (134). – С. 127 – 133.

4. Титов, М. Ю. Исследование связей свойств зоны ионизации и ускорения с магнитным полем в ускорительном канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 3 (138). – С. 96 – 102.

5. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электротехническая нелегированная. Технические условия [Текст]. – Введ. 1977-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 5 с.

6. Преображенский, А. А. Магнитные материалы / А. А. Преображенский. – М. : Высш. шк., 1965. – 234 с.

7. ГОСТ 56514-2015. Нормы прочности автоматических космических аппаратов [Текст]. – Введ. 2016-01-01. – М. : Стандартиформ, 2015. – 5 с.

8. ANSOFT Maxwell / ANSYS Maxwell Documentation [Электронный ресурс]. Режим доступа <http://ansoft-maxwell.narod.ru/english.html>

9. Титов, М. Ю. Исследование влияния токов в катушках магнитной системы стационарного плазменного двигателя на распределение магнитного поля в разрядном канале [Текст] / М. Ю. Титов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 8(135). – С. 76 – 82.

10. Новик, Ф.С. Оптимизация процессов технологии методами

планирования экспериментов [Текст] / Ф. С. Новик, Я. Б. Арсов. – М. : Машиностроение, София: Техника, 1980. – 304 с.

11. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 278 с.

12. Гилл, Ф. Практическая оптимизация [Текст] / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт. – М. : Мир, 1985. – 509 с.

Поступила в редакцию 24.02.2017.

*Рецензент: д-р техн. наук, Ю.А. Сысоев,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков*