

УДК 621.455.32

М.Ю. Титов, А.В. Лоян, В.А. Подгорный, В.А. Федотенко

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ХОЛЛОВСКОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ ДО 100 ВТ

В работе представлена разработанная численная модель магнитной системы Холловского двигателя мощностью до 100 Вт. Моделирование магнитной системы выполнено в расчетном пакете ANSYS. Приведены результаты исследования влияния геометрии элементов магнитной системы на распределение параметров магнитного поля в ускорительном канале двигателя и за его срезом. Рассмотрен способ управления профилем магнитного поля за счет изменения взаимного расположения полюсных наконечников. Достоверность полученных численных результатов подтверждается экспериментальными исследованиями.

Численное моделирование, двигатель, магнитное поле, ускорительный канал, градиент, срединная линия

Введение

В настоящее время для решения задач активной коррекции и поддержания орбит космических летательных аппаратов успешно применяются электрореактивные двигатели (ЭРД). В связи с расширением круга задач решаемых при помощи микроспутников актуальным является разработка ЭРД малой мощности. Двигательные установки с потребляемой мощностью 50...200 Вт существуют, но только как научно-исследовательские, поскольку при уменьшении потребляемой мощности двигателя до 100 Вт наблюдается резкое снижение его эффективности [1].

Существуют проекты маломощных стационарных плазменных двигателей (СПД), показывающих хорошие результаты [2]. Второй же тип Холловских двигателей (ХД) – двигатель с анодным слоем (ДАС), работающий на мощностях до 100 Вт, является мало изученным. Если же сравнивать характеристики обоих типов двигателей, то ДАС по ряду параметров может быть лучше СПД [3] – это и обуславливает повышенный интерес к маломощным ДАС.

Магнитная система (МС), которая должна формировать оптимальное магнитное поле (МП) является критическим аспектом при создании ХД. Наглядным примером значимости МС на интегральные характеристики маломощных ХД является пример создания МП 50W [3], к.п.д. которого не превысил 6,3%. Как утверждают сами авторы, причиной столь низкой эффективности являются ошибки в проектировании магнитной системы. Поэтому решение задач направленных на формирование оптимального магнитного поля является актуальным и важным эта-

пом. Проблемы, возникающие при разработке МС хорошо известны, к ним относятся следующие [4, 5]:

- а) насыщение магнитопровода при уменьшении сечения магнитопровода;
- б) асимметричность, расфокусировка и неоднородность МП в канале двигателя;
- в) размагничивание (температура магнитопровода приближается к точке Кюри).

Решение вышеперечисленных проблем особенно усложняется при разработке маломощных (50...100 Вт) двигателей ввиду их малых геометрических размеров.

Существенно упрощает процесс разработки МС двигателя моделирование методом конечных элементов. Численный расчет позволяет найти решения, которые невозможно получить аналитически. Как правило, это связано со сложной трехмерной геометрией объекта. В данном случае для моделирования МС двигателя использовался программный комплекс конечно-элементного моделирования ANSYS 11.

1. Постановка задачи и цели

Целью исследований являлся расчет распределения локальных характеристик МП в ускорительном канале и в зоне за срезом канала, а также определение влияния геометрических параметров элементов конструкции на распределение МП.

При расчетах все усилия были направлены на получение наибольшего градиента изменения B_r , что особенно характерно для ДАС [6], и на обеспечения наименьших энергетических затрат на создание МП.

2. Численная модель

В качестве отправной точки для выбора основных параметров МС двигателя (габаритные размеры, диаметр сердечника, расположение катушки, число витков катушки, материалы и т. д.) послужила информация о параметрах лабораторной модели СПД-20 “ХАИ” (потребляемая мощность 50...100 Вт) [7], на основании которой и была создана экспериментальная модель маломощного ДАС (рис. 1).

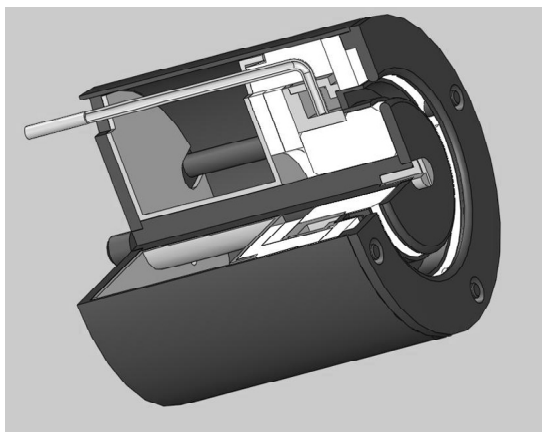


Рис. 1. Модель маломощного ДАС

Задача исследования МП двигателя решалась в двухмерном виде. Данное упрощение обуславливается аксиальной симметричностью конструкции и позволяет значительно экономить использование машинных ресурсов.

Расчетная модель состоит из упрощенной конструкции двигателя и пространства, в котором он находится (рис. 2).

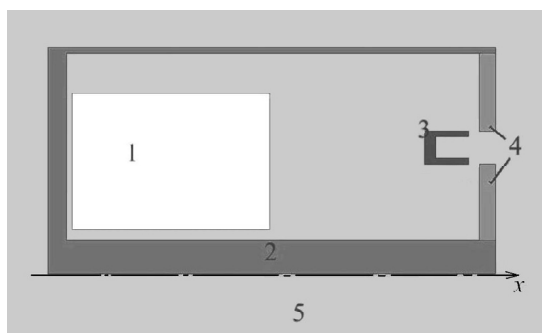


Рис. 2. Область моделирования:
1 – катушка; 2 – магнитопровод; 3 – магнитопроводящая часть анода (МПА); 4 – полюсные наконечники (наружный и внутренний); 5 – вакуум

Нет необходимости учитывать в расчете керамические и металлические немагнитопроводящие детали, поскольку никакой существенной роли в создании МП они не играют. Область окружа-

ющего пространства (вакуум) необходима для ограничения расчета индукции и напряженности МП. Ее размер определяется полями рассеивания.

Для описания магнитных свойств катушки и вакуума была задана магнитная проницаемость $\mu = 1$, а поведение магнитопроводящих материалов – кривой намагничивания (рис. 3).

Модель была разбита плоскими осесимметричными восьмиузловыми четырехугольными конечными элементами. Степень разбиения модели была определена несколькими пробными численными экспериментами. С одной стороны была обеспечена необходимая точность вычисления, с другой – снижено машинное время на расчет. В наиболее значимых областях вводились дополнительные расчетные области.

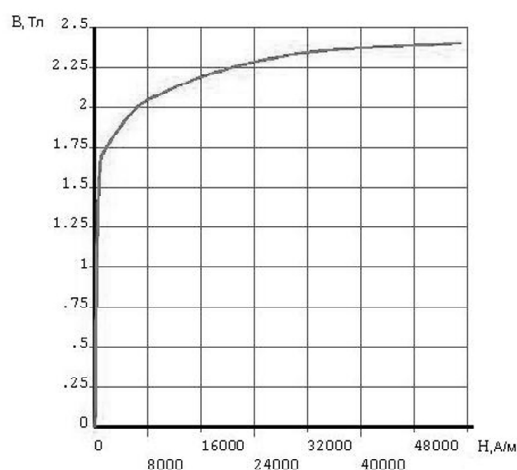


Рис. 3. Кривая намагничивания для материала 27KH:
 B – магнитная индукция; H – напряженность магнитного поля

Нагрузка осуществлялась путем задания через область катушки плотности тока J_s , рассчитанной по формуле:

$$J_s = \frac{n \cdot i}{S}, \quad (1)$$

где n – число витков, i – ток, S – площадь поперечного сечения катушки.

3. Результаты численного моделирования

В качестве критериев оптимизации МС двигателя были приняты следующие:

1. количественные
 - градиент изменения $Br - dBr/dx$;
 - максимальное значение радиальной составляющей индукции МП – Br_{max} ;
 - расположение Br_{max} в канале;
2. качественные

– форма силовых магнитных линий.

На рис. 4 представлена область исследования и показаны геометрические параметры двигателя, влияние которых изучалось.

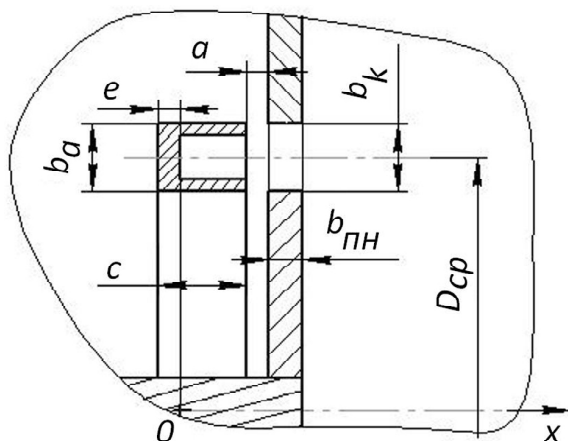


Рис. 4. Область исследования:
 e – толщина задней стенки МПА; c – длина МПА;
 b_a – ширина МПА; a – расстояние от МПА до полюсных наконечников (ПН); $b_{пн}$ – толщина ПН;
 b_k – ширина ускорительного канала; $D_{ср}$ – диаметр срединной линии канала

Исходные данные

- параметры катушки: $i = 5$ А, $n = 154$, $S = 300$ мм²;
- параметры МПА: $b_a = 3$ мм, $e = 1$ мм, $c = 4$ мм;
- другие параметры: $D_{ср} = 23$ мм, $b_k = 3$ мм, $b_{пн} = 2$ мм, $a = 0,5$ мм.

Влияние параметра “с”

Диапазон изменения параметра: $c = 2...6$ мм. Изменение Br вдоль срединной линии ускорительного канала показано на рис. 5.

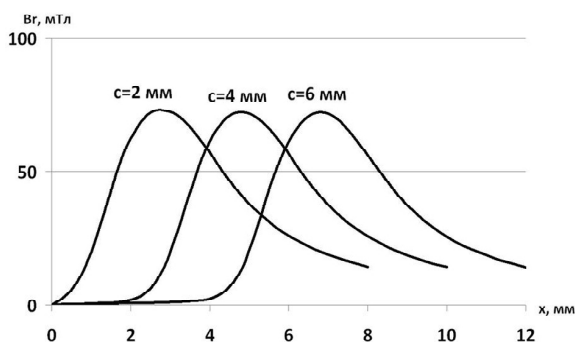


Рис. 5. Зависимость Br от длины магнитопроводящей части анода

Результаты расчета на рис. 5 показывают, что увеличение c оказывает влияние только на протяженность области с $Br \gg 0$ Тл внутри МПА.

Влияние параметра “e”

Диапазон изменения параметра: $e = 0,5...3$ мм. Изменение Br вдоль срединной линии ускорительного канала показано на рис. 6.

Можно сделать вывод, что изменение e не оказывает существенного влияния на МП в ускорительном канале.

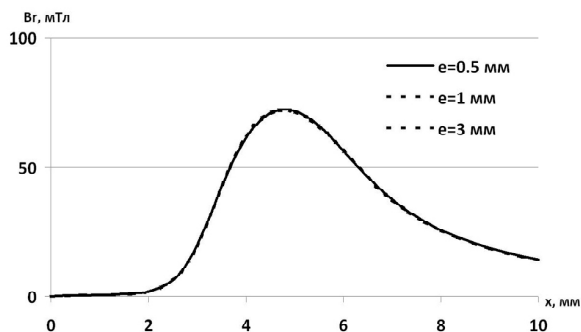


Рис. 6. Зависимость Br от толщины задней стенки магнитопроводящей части анода

Влияние параметра “a”

Диапазон изменения параметра: $a = 0,25...3$ мм. Изменение Br вдоль срединной линии ускорительного канала показано на рис. 7.

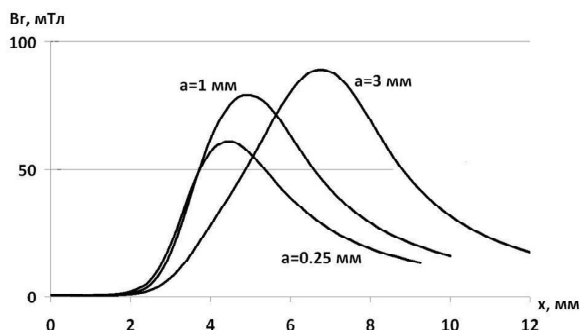


Рис. 7. Зависимость Br от расстояния между МПА и ПН

Анализ результатов расчета (рис. 7) показывает, что увеличение расстояния между МПА и ПН приводит к увеличению Br_{max} в кольцевом канале, однако приводит к уменьшению градиента ее изменения.

Влияние параметра “b_пн”

Диапазон изменения параметра: $b_{пн} = 1,5...4$ мм. Изменение Br вдоль срединной линии ускорительного канала показано на рис. 8.

Расчет показывает, что при увеличении $b_{пн}$:

- сначала наблюдается рост Br_{max} , а затем его снижение;
- проявляется область с протяженной Br_{max} .

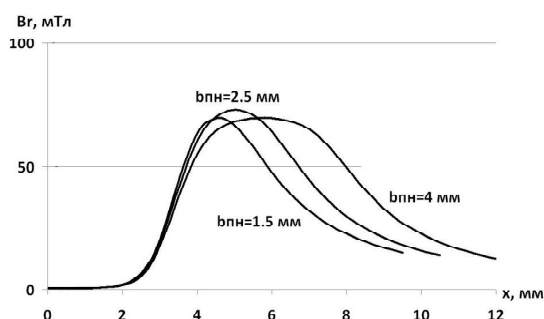


Рис. 8. Зависимость Br от толщины ПН

Влияние параметра “ b_a ”

Диапазон изменения параметра: $b_a = 2,4, 3, 4$ мм.

Было рассмотрено три предельных случая (рис. 9), когда ширина МПА b_a меньше, равна и больше ширины ускорительного канала b_k .

Изменение Br вдоль срединной линии ускорительного канала для трех случаев показано на рис. 10.

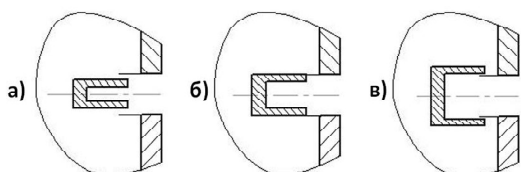


Рис. 9. Три возможных варианта соотношения b_a и b_k

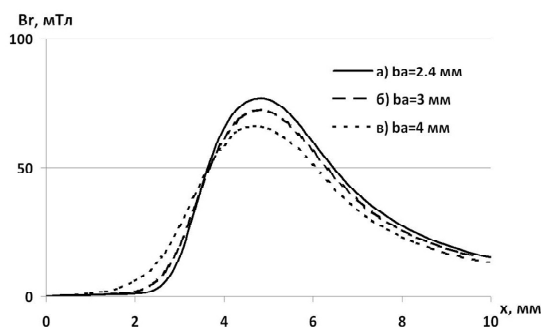


Рис. 10. Зависимость Br от ширины магнитопроводящей части анода

Из графика (рис. 10) следует, что вариант a является более предпочтительным и позволяет получить более высокие значения Br . Градиент изменения Br в кольцевом зазоре МС, для всех случаев, примерно одинаков.

Влияние зазора в магнитопроводящей части анода

Рассмотрено использование составной магнитопроводящей части анода (рис. 11) с целью упрощения изготовления двигателя.

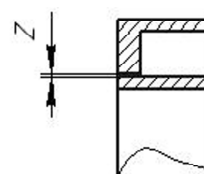


Рис. 11. Составная магнитопроводящая часть анода

Диапазон изменения параметра: $z = 0 \dots 0,1$ мм (при $a = 1$ мм, $b_{пн} = 1,5$ мм).

Рис. 12 показывает, что наличие зазора приводит к увеличению Br только внутри магнитопроводящей части анода и незначительно влияет на Br в основной области ускорительного канала.

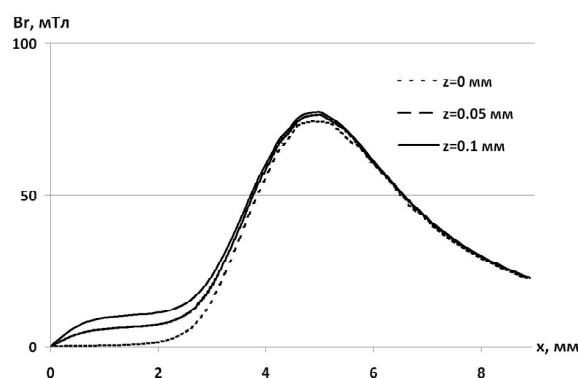


Рис. 12. Зависимость Br от величины зазора

Симметричность магнитных силовых линий

При проведении численных экспериментов заметного влияния геометрии элементов МС на профиль силовых магнитных линий обнаружено не было. Во всех случаях было замечено нарушение симметричности относительно срединной линии.

Попыткой восстановить симметричность являются ситуации, когда один из полюсных наконечников смещен относительно другого по оси x (рис. 13 – 15).

На рисунках 13 – 15 четко прослеживается, что изменением взаимного расположения ПН возможно управлять профилем магнитных силовых линий.

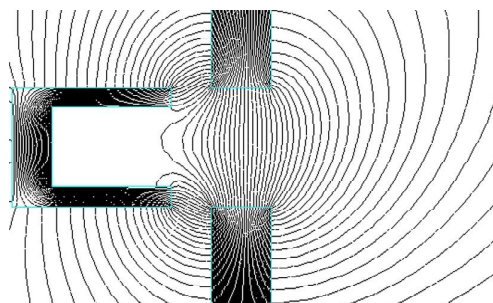


Рис. 13. Профиль силовых магнитных линий без смещения ПН

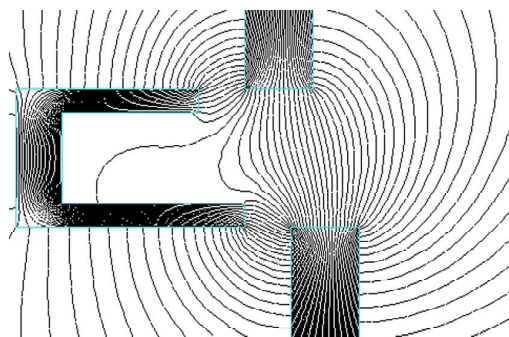


Рис. 14. Профиль силовых магнитных линий при смещении внутреннего ПН относительно внешнего ПН

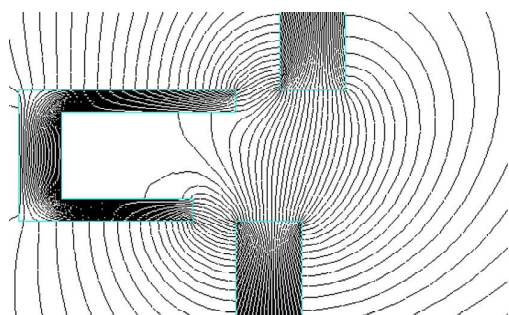


Рис. 15. Профиль силовых магнитных линий при смещении внешнего ПН относительно внутреннего ПН

4. Верификация полученных данных

Говорить о высокой точности вычислений позволяет лишь сравнение модели с ее реальным объектом.

Проверка адекватности модели осуществлялась на экспериментальной установке (рис. 16).

На рис. 17 представлены численные результаты расчета и экспериментально полученные данные.

Сравнительный анализ показывает, что расчетная величина индуктивности МП в канале двигателя не отличается от реально измеренной более чем на 5%.

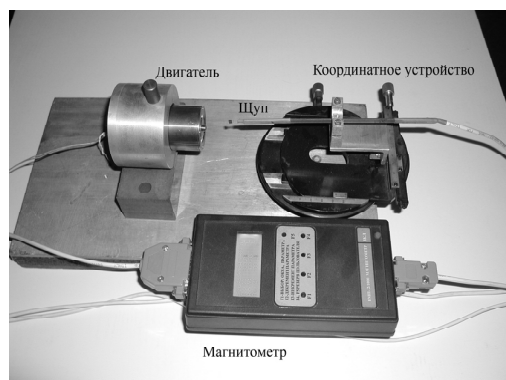


Рис. 16. Установка для измерения МП двигателя

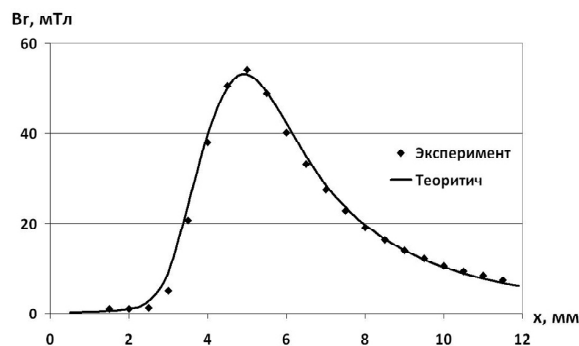


Рис. 17. Распределение B_r вдоль срединной линии ускорительного канала (при $I = 2$ А, $n = 192$, $b_a = b_k = 3$ мм, $b_{nn} = 1,5$ мм, $a = 1$ мм)

Выводы и перспективы дальнейших исследований в данном направлении

Приведенные в работе данные показывают необходимость и важность изучения влияния размеров и формы элементов МС двигателя на параметры МП, поскольку рациональный выбор геометрии позволяют не только повысить эффективность двигателя, но и снизить его массу и энергопотребление.

Использование разработанной численной модели позволяет проектировать МС двигателя, руководствуясь качественными и количественными показателями ($B_{r_{max}}$, профиль МП). Об адекватности модели свидетельствует незначительное отклонение расчетных и экспериментальных данных (менее 5%).

Поскольку расчеты проведены для МС в предпусковом режиме, то в дальнейшем предполагается исследовать влияние теплового состояния магнитопровода двигателя на распределение МП в канале двигателя.

Особый интерес представляет изучение влияния геометрии МС на параметры плазмы и фокусировку ионного пучка.

Перечень ссылок

1. An empirical performance prediction model for Hall Thrusters / L. Biagioni, M. Saverdi // Journal of Technical Physics. – 2008. – Vol. XLIX, № 3–4. P. 187–200.

2. Максименко Т. А. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты малых мини и микроспутников / Т. А. Максименко, А. В. Лоян, Н. Н. Кошелев // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2005. – Вып. 4. – С. 404–408.

3. Khayras V. Preliminary Experimental Evaluation of a Miniaturized Hall Thruster / V. Khayras, M. Martinez-Sanchez // 25th Int. Electric

Propulsion Conference, Cleveland, Ohio, USA, 24–28 Aug. 1997. – IEPC 97–077.

4. Ahedo E. Scaling down Hall Thrusters / E. Ahedo, J. M. Gallardo // 28th Int. Electric Propulsion Conference, Toulouse, France, 17–21 March 2003. – IEPC 2003–104.

5. Кулагин С. Н. Влияние геометрических факторов на процессы ионизации в Холловском двигателе // С. Н. Кулагин // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. / М-во

образования и науки Украины, Нац. аэрокосмич. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2005. – Вып. 4. – С. 412–415.

6. Стационарные плазменные двигатели / Н.В. Белан, В.П. Ким, А.И. Оранский, В.Б. Тихонов – Х.: ХАИ, 1989. – 315с.

7. Loyan A. V. Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Thruster / A.V. Loyan, T.A. Maksymenko // 30th Int. Electric Propulsion Conference, Florence, Italy, 16–20 Sept. 2007. – IEPC 2007–100.

Поступила в редакцию 01.06.2010 г.

M. Yu. Titov, A. V. Loyan, V. A. Podgorny, V. A. Fedotenko

NUMERICAL MODELING OF MAGNETIC SYSTEM FOR HALL THRUSTER WITH POWER UP TO 100 W

У роботі представлена розроблена чисельна модель магнітної системи Холловського двигуна потужністю до 100 Вт. Моделювання магнітної системи виконувалося в розрахунковому пакеті ANSYS. Досліджено впливи геометрії елементів магнітної системи на розподіл параметрів магнітного поля в прискорювальному каналі двигуна та за його зрізом. Розглянуто спосіб управління профілем магнітного поля за рахунок зміни взаємного розташування полюсних наконечників. Достовірність отриманих чисельних результатів підтверджується експериментальними дослідженнями.

Чисельне моделювання, двигун, магнітне поле, прискорювальний канал, градієнт, середина лінія

The paper presents developed numerical model of magnet system for Hall thruster with power up to 100 W. The simulation of the magnetic system was carried out in the software package ANSYS 11. The influence of geometry of magnet system elements on the distribution of parameters of magnetic field in the accelerating channel of the thruster is shown. The way to control the magnetic field profile by changing the relative position of the pole pieces is reviewed. The validity of the numerical results is confirmed by experimental studies.

Numerical modeling, thruster, magnetic field, acceleration channel, gradient, the median line