

УДК 533.9.07

Т.А. МАКСИМЕНКО, И.П. ПЕЧЕНЕЖСКИЙ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПОЛОГИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ**

Рассмотрены проблемы создания оптимального магнитного поля для стационарного плазменного двигателя малой мощности (МСПД). Приведены результаты моделирования распределения магнитного поля для МСПД и их сравнение с экспериментальными данными.

стационарный плазменный двигатель, магнитопровод, топология магнитного поля, конечно-элементная модель

Введение

Общая постановка проблемы и ее связь с научно-практическими задачами. Электрореактивные двигатели типа стационарного плазменного двигателя (СПД) успешно применяются для коррекции и поддержания орбиты искусственных спутников земли (ИСЗ), начиная с 70-х годов прошлого века. Имеется большое количество как теоретических, так и практических наработок по двигателям мощностью 1,5 – 3 кВт для аппаратов с энерговооруженностью порядка 10 кВт и более. В то же время, все больший интерес проявляется к двигателям малой мощности. Разрабатываются различные методы понижения мощности, как путем внесения изменений в конструкцию существующих моделей, так и путем разработки новых моделей с уменьшением сечения разрядной камеры. Во всех случаях требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования, так как непосредственное масштабирование и применение методик и математических моделей, разработанных для двигателей большого и среднего класса, не дают возможности разработать МСПД с приемлемыми параметрами.

Обзор публикаций и анализ нерешенных проблем. Принцип работы СПД были предложен А.И. Морозовым и создан впервые в Институте им. И.В. Курчатова во второй половине 60-х годов [1]. Основной проблемой и поныне остается разработка

магнитной системы двигателя, ввиду того, что преимущественно от магнитного поля в разрядной камере (РК) зависят условия формирования зоны ионизации и ускорения (ЗИУ), и, как следствие – основных рабочих параметров двигателя.

Поле деятельности в этом направлении ничуть себя не исчерпало даже для СПД большого класса. Об этом хорошо свидетельствует такая разработка, как АТОН [2], а также работы ведущих мировых организаций в этом направлении [3, 4].

Проектирование же магнитной системы для МСПД связано с целым рядом дополнительных проблем. Одной из основных является массо-габаритные ограничения, которые влекут за собой вынужденный уход от классической компоновки магнитной системы и увеличение теплонапряженности конструкции.

Цель исследований. Целью исследований является установление распределения магнитного поля лабораторной модели МСПД; создание математической модели, позволяющей без проведения натуральных экспериментов с заданной степенью точности прогнозировать изменение топологии магнитного поля при изменении конструкции двигателя.

Результаты исследований

В Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» на каф. 402 была разработана, изготовлена и испытана лабораторная мо-

дель МСПД СПД-20М. Результаты испытаний одной из последних модификаций показали, что двигатель при потребляемой мощности менее 100Вт выдает параметры, превосходящие параметры мировых аналогов: тяга – 5мН, удельный импульс – 1350с, КПД – 34% [5].

Проектирование магнитной системы двигателя изначально было направлено на выполнение условия подобия конфигурации магнитного поля отработанной модели СПД типа М70. Это условие в полной мере выполнить не удалось ввиду малых габаритов системы. Однако, за счет применения анода-газораспределителя специальной конфигурации, а также специальных магнитных материалов, было получено распределение магнитного поля, качественно и количественно отвечающее основным требованиям формирования ЗИУ в СПД [5].

Моделирование распределения магнитного поля для магнитной системы МСПД произведено при помощи аппарата конечно-элементного (КЭ) анализа. Исходными данными для создания КЭ модели явилась информация о геометрических параметрах действующей лабораторной модели СПД, паспортных характеристиках использованных материалов, условиях работы и данных по предварительно проведенной серии натурных испытаний по определению конфигураций магнитного поля.

Описание конечно-элементной (КЭ) модели. В общем случае задача исследования топологии магнитного поля СПД является трехмерной (рис. 1). Однако, в первом приближении, вследствие аксиальной симметрии конструкции двигателя, возможен переход к решению двухмерной задачи (рис. 1, а).

Переход к двухмерной задаче позволяет значительно сэкономить использование машинных ресурсов. Сущность упрощения в этом случае сводится к замене магнитопроводящих шпилек 3б однородным цилиндрическим внешним магнитопроводом 3а. Описанное снижение размерности задачи приводит

к тому, что азимутальная неоднородность исследуемого поля не принимается во внимание.

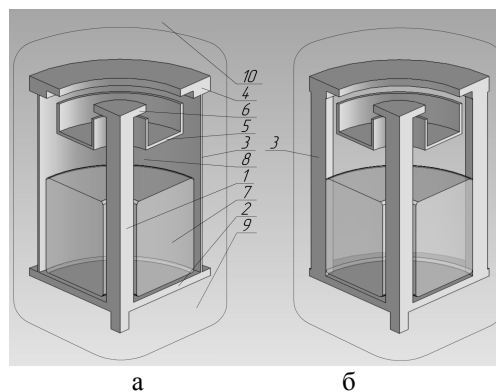


Рис. 1. Расчетная двухмерная (а) и трехмерная (б) модели: 1 – центральный магнитопровод; 2 – основание; 3,а – внешний магнитопровод; 3,б – шпилька магнитопровода; 4 – внешний магнитный полюс; 5 – анод; 6 – внутренний магнитный полюс; 7 – соленоид; 8 – внутриводительное пространство; 9 – околотовительное пространство; 10 – невотительное пространство

Данное приближение в полной мере применимо для абсолютно аксиально симметричных моделей двигателя, где вместо периферийных магнитопроводящих шпилек применяется цилиндрическая оболочка.

Учитывая то, что азимутальная неоднородность магнитного поля в РК может оказывать существенное влияние на параметры двигателя, возникает необходимость в решении полной трехмерной задачи. Однако, это влечет за собой увеличение времени машинного счета на 2 – 3 порядка; при попытке же создания динамической модели, это приводит к неоправданно большим затратам на временные и машинные ресурсы даже при современном уровне достижений в области вычислительной техники.

Геометрические параметры. Расчетные модели двух- и трехмерной задач состоят из элементов упрощенной конструкции двигателя и пространства, в котором он находится (рис. 1). Под внутриводительным пространством понимается совокупность элементов конструкции (кроме тела соленоида), обладающих пара- и диамагнитными свойствами, совместно со свободным от элементов конструкции

пространством, ограниченным внешними границами двигателя. Под околосдвигательным пространством понимается свободное пространство, ограниченное внешними границами двигателя и границами пространства, находящегося на расстоянии одного характерного размера конструкции от внешних границ. Для сокращения затрат машинного времени, трехмерная задача определения топологии поля всей модели, в силу аксиальной симметрии, была сведена к задаче определения топологии поля 1/4 части модели.

Свойства материалов. Магнитные свойства материала элементов конструкции магнитопровода в моделях (двух- и трехмерной) описаны полилинейной зависимостью $B(H)$, представленной на рис. 2.

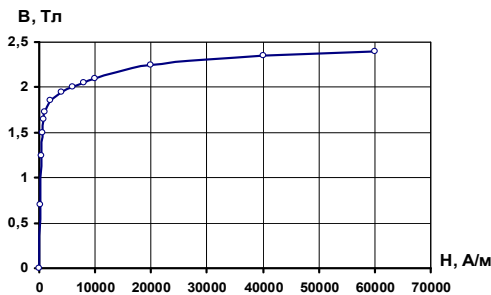


Рис. 2. Магнитные свойства материала элементов конструкции магнитопровода (точками на кривой отмечены значения B и H , между которыми производится линейная аппроксимация действительных значений)

Необходимое для описания свойств материала количество точек, аппроксимирующих действительную зависимость $B(H)$, определено из серии пробных численных экспериментов. Магнитные свойства соленоида, внутри-, около- и внедвигательного пространства описаны величиной относительной магнитной проницаемости ($\mu = 1$). Учет магнитных свойств всех материалов производится путем формирования матрицы магнитной проницаемости $[\mu]$ с последующей подстановкой ее в уравнение (1), описывающее поведение магнитопроводящих материалов:

$$\vec{B} = [\mu]\vec{H}, \quad (1)$$

где \vec{H} – вектор напряженности магнитного поля;

\vec{B} – вектор магнитной индукции.

Дискретизация пространства. Дискретизация всех элементов конструкции магнитопровода, соленоида, внутри- и околосдвигательного пространства двухмерной задачи произведена плоскими осесимметричными восьмиузловыми четырехугольными КЭ; трехмерной задачи – четырехгранными десятиузловыми КЭ (соленоид трехмерной задачи описан отдельным специальным элементом). Для двухмерной задачи дискретизация внедвигательного пространства, находящегося на расстоянии одного характерного размера конструкции от внешних границ двигателя, произведена плоскими осесимметричными восьмиузловыми четырехугольными КЭ, моделирующими полубесконечные пространства. Для трехмерной задачи – четырехузловыми четырехугольными КЭ.

Для установления оптимальной степени дискретизации пространства и элементов конструкции был проведен ряд пробных численных экспериментов, на основании которых была определена зависимость значений исследуемых параметров от плотности сетки КЭ и затрачиваемого машинного времени. На основании полученных результатов окончательная плотность сетки КЭ в моделях (двух- и трехмерной) выбрана таким образом, что стороны (ребра) трех КЭ образуют наименьший характерный размер элемента конструкции магнитопровода; плотность КЭ во всех элементах магнитопровода одинакова; дискретизация внутри- и околосдвигательного пространства реализована таким образом, что последние заполняются элементами, размеры которых равномерно увеличиваются по мере удаления от зоны контакта с элементами магнитопровода и приближения к зоне контакта с элементами, описывающими полубесконечное пространство.

Условия нагружения модели. Планом эксперимента было предусмотрено варьирование силой тока ($i = 2; 2,5; 3A$) с направлением течения тока против хода стрелки часов относительно верхнего торца двигателя; задано известное количество витков соленоида и его площадь поперечного сечения.

Учет условий нагружения производится посредством передачи значений вектора плотности тока \vec{J}_s (2) в уравнение Максвелла для магнитных стационарных полей (3):

$$\vec{J}_s = \frac{n\vec{i}}{S}; \quad (2)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s. \quad (3)$$

Верификация модели. Для верификации созданной математической модели необходимо проведение сравнения полученных модельных результатов с результатами, полученными при проведении натурального эксперимента.

В качестве критериев сравнения приняты: качественные – распределение эквипотенциальных линий магнитного поля в случае двухмерной задачи и распределение векторного поля \vec{B} в случае трехмерной задачи; количественные – распределение $B_r(z)$ по «контрольным линиям» A1, A2, A3, A4 в случае двухмерной задачи и B1, B2, B3, B4 в случае трехмерной задачи (рис. 3).

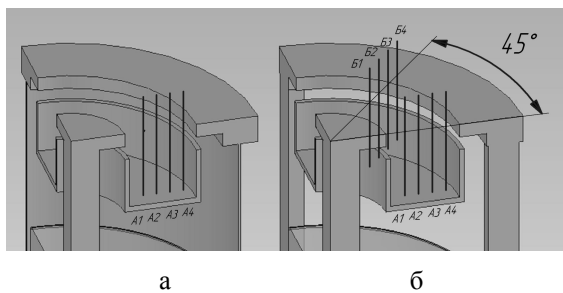


Рис. 3. Местоположение «контрольных линий» снятия натуральных значений магнитной индукции $B_r(z)$ в случае двухмерной (а) и трехмерной (б) задач

Ниже приведена часть результатов моделирования и их сравнение с данными натурального эксперимента (рис. 4 – 6).

Анализ зависимостей $B_r(z)$, установленных посредством численного эксперимента на «контрольных линиях» для двухмерной и трехмерной задач, показал с качественной точки зрения незначительные отличия от данных натуральных экспериментов.

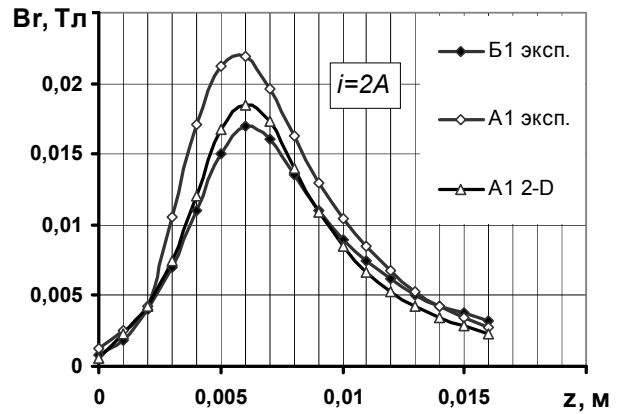


Рис. 4. Сравнение натурального и модельного распределения магнитной индукции $B_r(z)$ по «контрольным линиям» в случае двухмерной (2-D) задачи

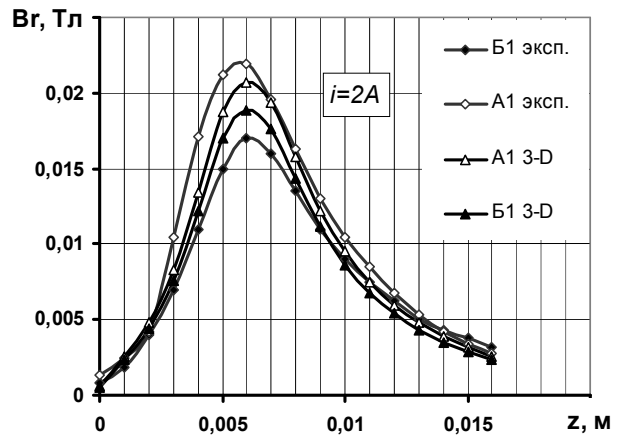


Рис. 5. Сравнение натурального и модельного распределения магнитной индукции $B_r(z)$ по «контрольным линиям» в случае трехмерной (3-D) задачи

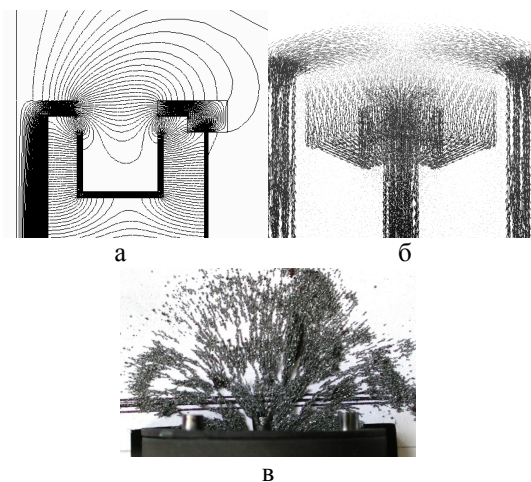


Рис. 6. а – распределение эквипотенциальных линий магнитного поля для двухмерной задачи; б – распределение поля \vec{B} в трехмерной задаче; в – натурная визуализация магнитного поля лабораторного МСПД

С количественной точки зрения полученные теоретические значения $B_r(z)$ можно охарактеризовать также как адекватные экспериментальным значениям (несовпадение теоретических величин с данными натурных экспериментов составляет порядка 10%). Полученные отличия можно объяснить погрешностью, вносимой при проведении натурального эксперимента, не полным соответствием табличных данных $B(H)$ для образцов материала, выпускаемых на массовом производстве и с их изменением после механической и термической обработки, наличием ряда вышеописанных допущений (характерного для решения задач при помощи метода КЭ) при постановке численного эксперимента.

Сравнительный анализ данных, полученных при помощи численного и натурального эксперимента, позволяет сделать вывод об адекватности разработанной математической модели магнитной системы МСПД.

Перспективы дальнейших исследований

Полученные результаты позволяют в дальнейшем при помощи численного эксперимента создавать магнитные системы МСПД с минимальными затратами на ее изготовление. При этом полученные результаты позволяют добиться распределения магнитного поля в РК, максимально приближенного к оптимальному, и, как следствие, улучшить интегральные характеристики двигателя.

Заключение

В ходе описанной работы проведены исследования распределения магнитного поля разработанной модели МСПД. Проведены сравнения полученных экспериментальных данных с результатами численного моделирования. По результатам сравнения можно сказать, что численная модель адекватно ка-

чественно и количественно описывает распределение магнитного поля для МСПД и может служить инструментом для проектирования магнитной системы, которая бы обеспечила оптимальное распределение магнитного поля в РК МСПД.

Авторы работы приносят благодарность сотрудникам кафедры 402 Лояну А.В., Кошелеву Н.Н., Степанушкину Н.П. за ценные замечания и обсуждение результатов. Данная работа проведена в рамках проекта УНТЦ №1936.

Литература

1. Морозов И. Пламенные ускорители. – М.: Машиностроение, 1973. – 344 с.
2. Морозов И. и др. // Физика плазмы. – 1997. – Т. 23, №7. – С. 635-645.
3. Blinov V., Gorshkov A., Shagayda A. Experimental Investigation of Magnetic Field Topology Influence on Structure of Accelerating Layer and Performance of Hall Thruster // Proceedings of the 29th International Electric Propulsion Conference, IEPC-2005-033 – Princeton University. (October 31 – November 4, 2005). – P. 112-124.
4. Балашов В.Н., Дураченко В.М., Кошкин М.И. Выбор конструктивных характеристик магнитной системы стационарного плазменного двигателя // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 8. – С.212-215.
5. Максименко Т.А., Лоян А.В., Кошелев Н.Н. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты малых мини и микро спутников // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 9. – С. 111-115.

Поступила в редакцию 1.06.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Харьков.