

УДК 621.455.32

М. Ю. ТИТОВ

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОКОВ В КАТУШКАХ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В РАЗРЯДНОМ КАНАЛЕ

В данной работе приведены результаты расчетов магнитного поля стационарного плазменного двигателя типа М70 для различных токов катушек намагничивания. Расчеты выполнены в пакете МКЭ моделирования Ansoft Maxwell 14.0. Задача расчета магнитного поля решалась с помощью двухмерной эквивалентной схемы магнитной системы двигателя. Влияние токов внутренней и наружных катушек рассмотрено по отдельности. Сделаны выводы о влиянии на радиальную составляющую индукции магнитного поля в разрядном канале двигателя. Показано влияние токов в катушках на профиль силовых магнитных линий.

Ключевые слова: стационарный плазменный двигатель, магнитная система, катушка намагничивания.

Введение

Магнитная система стационарного плазменного двигателя (СПД) предназначена для создания в разрядном канале (РК) двигателя магнитного поля. Параметры магнитного поля, его величина и пространственное распределение, играют ключевую роль в протекании физических процессов в двигателе и, соответственно, в значительной степени определяют выходные характеристики двигателя: к.п.д, тягу, ресурс, угол расходимости струи [1, 2]. Так же магнитная система определяет массово габаритные характеристики двигателя, т.к. имеет $\approx 80\%$ от общей массы двигателя.

Магнитное поле в СПД создается за счет протекания электрического тока в катушках намагничивания магнитной системы. При испытаниях двигателя на каждом рабочем режиме оптимальные токи в катушках выбираются из условия минимума разрядного тока [3]. Однако, как показывают эксперименты, существует диапазон токов катушек намагничивания, в которых разрядный ток является величиной постоянной [4 – 6]. При этом некоторые характеристики двигателя либо так же постоянны, либо изменяются. Так, например, в работе [4] показано, что при увеличении тока наружных катушек в 1,5 раза (от 4 до 6 А) разрядный ток и тяга двигателя остаются неизменными, но скорость эрозии РК увеличивается в $\approx 1,5$ раза и, соответственно, уменьшается ресурс двигателя.

Таким образом, с целью установления взаимосвязей между токами катушек и характеристиками двигателя, необходимо, прежде всего, понимать, как при этом изменяется магнитное поле в РК двигателя. Совместно с исследованием распределения локальных параметров плазмы в РК [7] это должно

внести более полное понимание физик происходящих процессов и в частности, о влиянии на них магнитного поля.

В связи с вышесказанным, целью данной работы являлось исследование влияния токов в катушках намагничивания на распределение магнитного поля в РК СПД методом численного моделирования в пакете Ansoft Maxwell 14.0.

Расчетная модель магнитной системы построена на основе разработанного двигателя СПД типа М70 и проходящего испытания [8 – 10]. В качестве начальной точки для параметров расчетов были взяты оптимальные токи в катушках намагничивания на одном из режимов работы двигателя. Для этих токов в пакете Maxwell проводился расчет магнитного поля. Затем поочередно исследовалось влияние тока каждой группы катушек намагничивания (внутренней и наружной) при фиксированном токе через другую группу катушек.

1. Описание расчетной модели

Магнитная система (МС) двигателя не является осесимметричной конструкцией, однако для снижения числа элементов и сокращения расчетного времени возможен переход плоскому, двумерному моделированию с применением эквивалентной схемы (рис. 1). Вместо 4х отдельных наружных катушек и сердечников в 2d модели используется 1 общий сердечник, снаружи и внутри которого расположены 2 катушки, при этом токи в катушках направлены встречно.

Сравнительный анализ 2d расчета эквивалентной модели и 3d расчета реальной магнитной системы показывает разницу в распределении индукции МП не более 5% (рис. 2). Вместе с тем, расчетное время снижается в 12-15 раз с 90 минут для 3d рас-

чета до 5-7 минут для 2d расчета (Компьютер Intel(R) Core (TM) i5-6400 CPU @ 2,70 GHz, ОЗУ 16,00 ГБ).

измеренными и расчетными данными составила не более 5%.

2. Результаты расчетов

2.1. Оптимальные токи через катушки

На рис. 3 приведено распределение B_r в РК при оптимальных токах через катушки намагничивания, выбранных из условия минимума разрядного тока. Из особенностей распределения можно отметить, что в плоскости среза РК величина B_r у внутренней стенки в 1,5 раза больше, чем у наружной стенки, а так же наличие области с отрицательным B_r , расположенной вдоль наружной стенки.

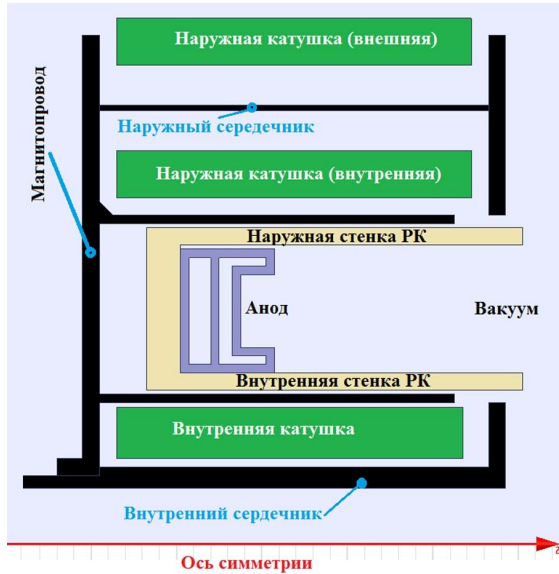


Рис. 1. Эквивалентная 2d модель магнитной системы СПД

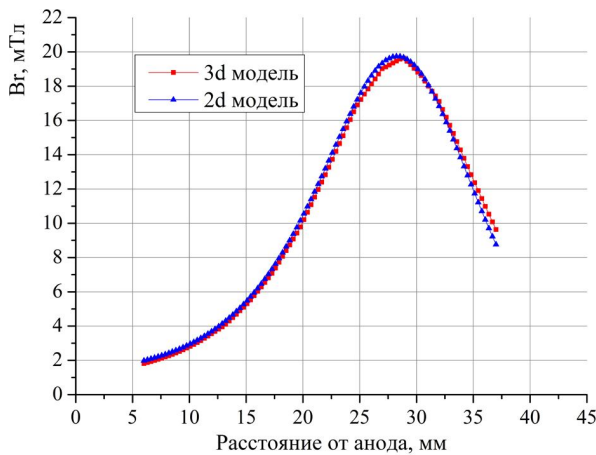


Рис. 2. Распределения B_r вдоль средней линии РК СПД полученные на 3d и 2d расчетных моделях

Оптимальное количество конечных элементов (КЭ) модели определялось из условия минимального расчетного времени и неизменности величины МП при увеличении количества КЭ, аналогичным образом, как и в работе [11].

Магнитные свойства элементов магнитной системы (сталь 10880 и сплав 49КФ) взяты из справочных данных [12, 13].

Выходные данные расчетов - распределение радиальной составляющей индукции магнитного поля B_r и профиль силовых магнитных линий (СМЛ) в РК двигателя.

Верификация результатов расчета проводилась аналогично [14]. Разница между экспериментально

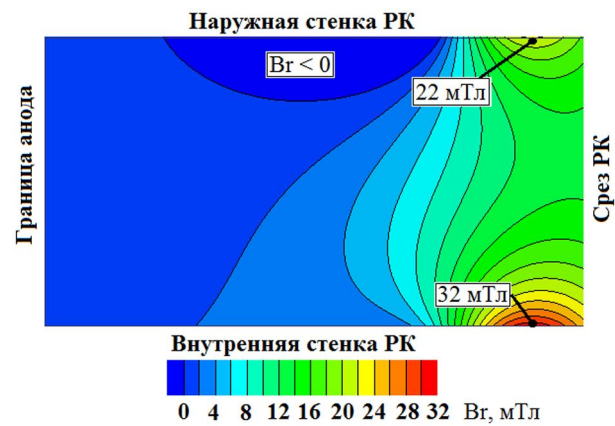


Рис. 3. Распределение B_r в РК при оптимальных токах через катушки намагничивания

На рис. 4 приведен профиль СМЛ при оптимальных токах через катушки. Наблюдается асимметричность СМЛ относительно средней линии канала, а так же их наклон к внутренней стенке РК.

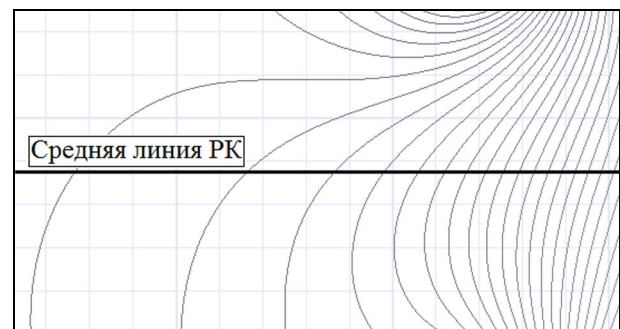


Рис. 4. Профиль СМЛ в РК СПД

2.2. Изменение тока внутренней катушки

Рассмотрим, как изменяется распределение B_r вдоль стенок РК и средней линии при изменении тока через внутреннюю катушку. Ток наружной катушки при этом зафиксирован и равен оптимальному значению.

На рис. 5, 6, 7 приведено распределение B_r вдоль внутренней стенки РК, средней линии канала и наружной стенки РК, соответственно.

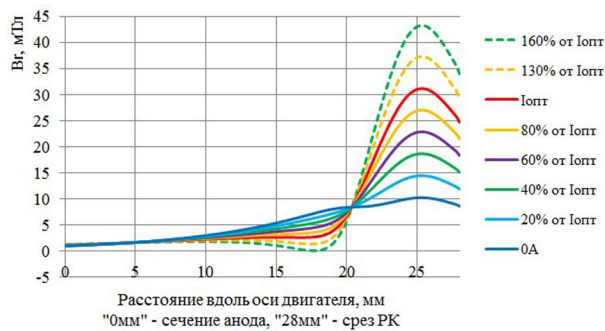


Рис. 5. Распределение B_r вдоль внутренней стенки в зависимости от тока внутренней катушки

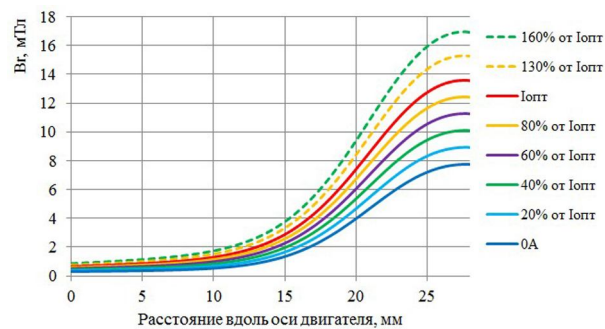


Рис. 6. Распределение B_r вдоль средней линии канала в зависимости от тока внутренней катушки

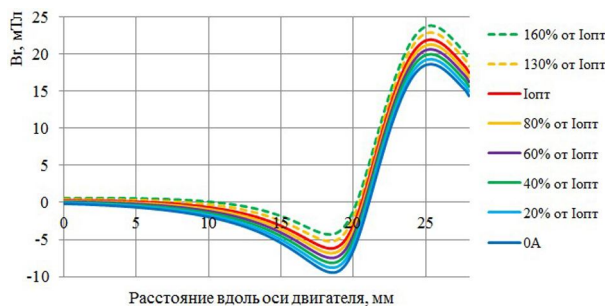


Рис. 7. Распределение B_r вдоль средней линии канала в зависимости от тока внутренней катушки

По приведенным выше графикам видно, что изменение B_r пропорционально изменению тока через внутреннюю катушку. В направлении от внутренней к наружной стенке изменение B_r проявляется в меньшей степени. Например, при уменьшении тока в 0,8 раз у внутренней стенки B_{rmax} уменьшается на 4,1 мТл, на средней линии на 1,1 мТл, а у наружной стенки на – 0,6 мТл.

Обращает на себя внимание то, что положение B_{rmax} по сечению канала остается постоянным.

При отключении тока через катушку (0А) наблюдается двухпиковое распределение B_r , и увеличивается протяженность области с максимальными значениями B_r .

При уменьшении тока через внутреннюю катушку область с отрицательным значением B_r вдоль наружной стенки увеличивается. При увеличении тока внутренней катушки более чем в 1,6 раз область с отрицательным B_r возникает и у внутренней стенки.

На рис. 8, 9 показано изменение профиля СМЛ с изменением тока через внутреннюю катушку. Можно отметить, что при увеличении тока через внутреннюю катушку уменьшается наклон линий в области в области среза РК, а при увеличении тока в 2 раза (рис. 8 с) профиль СМЛ приобретает «идеальный» симметричный относительно средней линии канала вид [15]. При выключении тока через внутреннюю катушку (рис. 9 с) СМЛ равномерно замыкаются на внутренний магнитный экран и полюсный наконечник.

2.3. Изменение тока наружных катушек

Аналогичным образом рассмотрим, как изменяется магнитное поле в РК при изменении тока наружных катушек. На рис. 10, 11, 12 приведено распределение B_r вдоль внутренней стенки, средней линии канала и наружной стенки РК. На рис. 13 и 14 представлены профили СМЛ при изменении тока через наружные катушки.

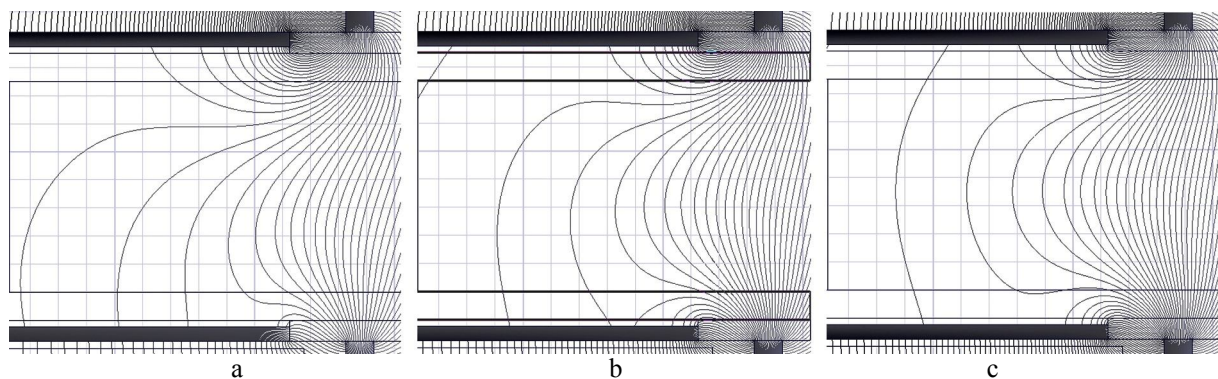


Рис. 8. Профиль СМЛ при увеличении тока через внутреннюю катушку: а – $I_{опт}$; б – 160% от $I_{опт}$; в – 200% от $I_{опт}$

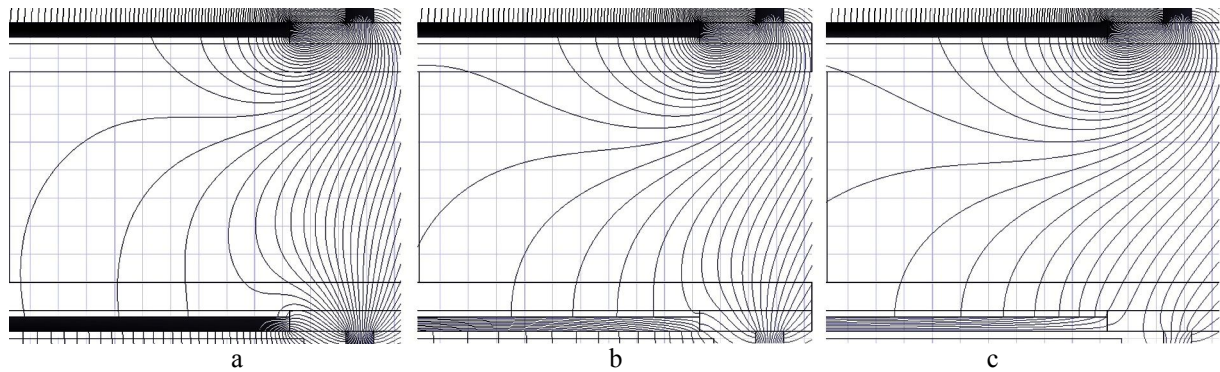


Рис. 9. Профиль СМЛ при уменьшении тока через внутреннюю катушку:
a – $I_{опт}$; b – 40% от $I_{опт}$; c – 0A

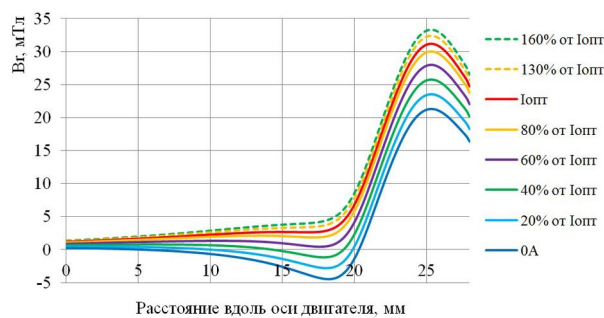


Рис. 10. Распределение B_r вдоль внутренней стенки в зависимости от тока наружных катушек

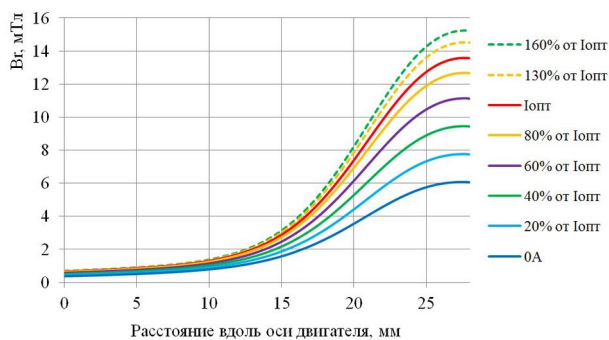


Рис. 11. Распределение B_r вдоль средней линии канала в зависимости от тока наружных катушек

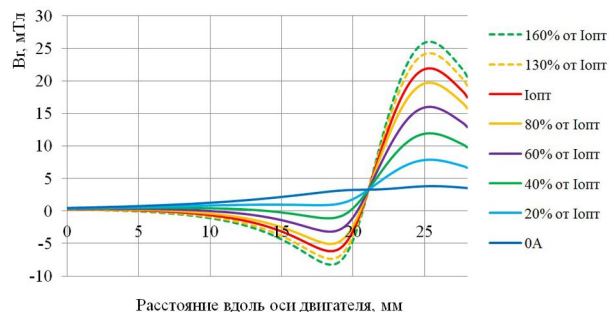


Рис. 12. Распределение B_r вдоль средней линии канала в зависимости от тока наружных катушек

Приведенные выше распределения B_r для различных токов через наружные катушки симметрич-

но повторяют зависимости, полученные при варьировании тока внутренней катушки:

- изменение тока оказывает большее влияние на изменение величины B_r вдоль наружной стенки РК;
- при нулевом токе через наружные катушки наблюдается двухпиковое распределение B_r и увеличение протяженности области с максимальными значениями B_r вдоль наружной стенки РК;
- фиксированность положения $B_{r_{max}}$ при изменении тока через наружную катушку
- уменьшение области с отрицательным B_r вдоль наружной стенки и ее увеличение вдоль внутренней стенки при увеличении тока через наружную катушку.

Аналогично с B_r мы наблюдаем симметричное поведение и в изменении профиля СМЛ. Необходимо отметить, что теперь для получения профиля СМЛ симметричного относительно средней линии канала необходимо уменьшать ток наружных катушек (рис. 14 б). При уменьшении тока так же происходит уменьшение наклона СМЛ к внутренней стенке канала.

2. Влияние тока катушек на разрядный ток двигателя

Экспериментально были получены следующие зависимости разрядного тока от тока катушек намагничивания (рис. 15). По полученным зависимостям видно, что разрядный ток увеличивается при уменьшении тока катушек ниже оптимальных значений. Диапазон тока внутренней катушки, при котором ток разряда является постоянной величиной, шире, чем для наружных катушек – [1;3,5] против [1;1,5].

Необходимо отметить, что только при токе внутренней катушки намагничивания обеспечиваем «идеальный» симметричный профиль СМЛ относительно средней линии РК выполняется условия минимума разрядного тока.

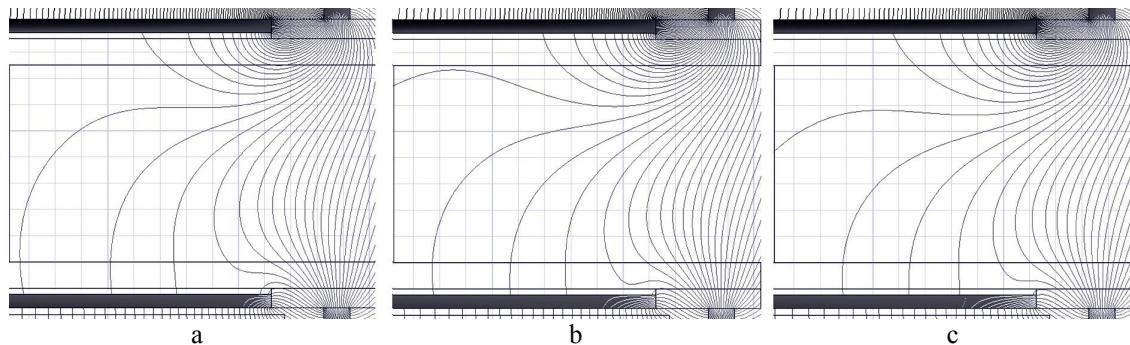


Рис. 13. Профиль СМЛ при увеличении тока через наружные катушки:
а – $I_{опт}$; б – 160% от $I_{опт}$; в – 200% от $I_{опт}$

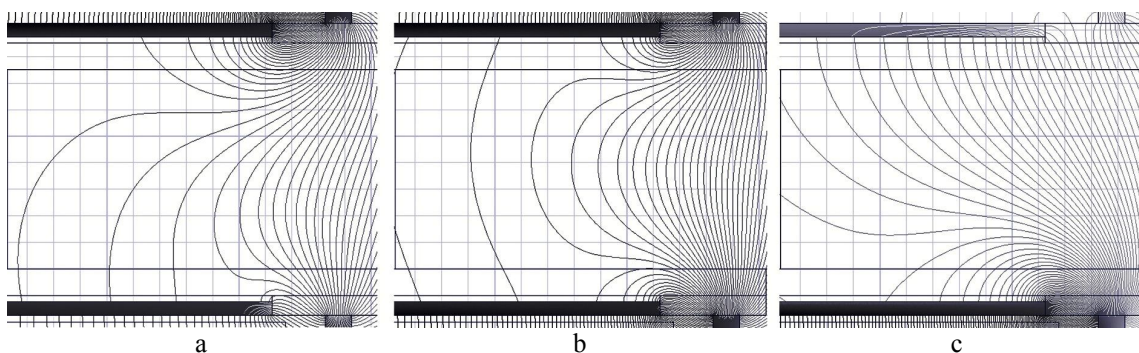


Рис. 14. Профиль СМЛ при уменьшении тока через наружные катушки:
а – $I_{опт}$; б – 40% от $I_{опт}$; в – 0 А

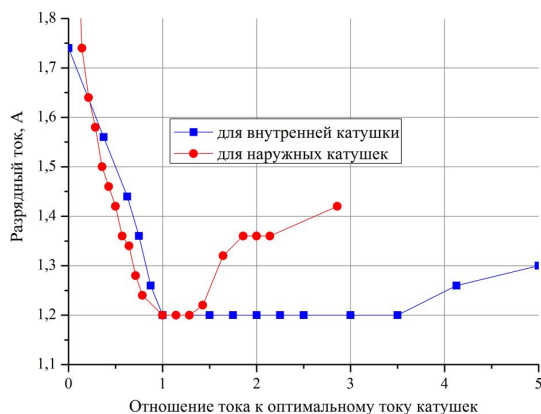


Рис. 15. Зависимость разрядного тока от токов внутренней и наружных катушек ($\dot{M}_a = 1,3$ мг/с, $U_d = 150$ В)

Выводы

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- изменение величины B_r в РК СПД пропорционально изменению тока в одной из групп катушек магнитной системы двигателя, причем изменение B_r проявляется в большей степени со стороны расположения группы катушек и в меньшей степени с противоположной стороны РК;

- изменение тока в каждой из групп катушек не приводит к смещению положения $B_{r_{max}}$;

- изменением тока в катушках намагничивания возможно управлять наклоном СМЛ в области выхода из РК;

- возможны случаи, когда «идеальная» конфигурация силовых магнитных линий в канале двигателя не обеспечивает критериев максимальной эффективности двигателя (минимум разрядного тока).

Литература

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 IEPC-2005-033. – 2005. – P. 1-10. Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2005index/033.pdf. – 1.04.2016.
2. *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.
3. Kim, V. *Main physical features and processes determining the performance of stationary plasma thrusters* [Электронный ресурс] / V. Kim // *Journal of Propulsion and Power*. – 1998. – Vol. 14, № 5. – P. 736-743. Режим доступа: <http://web.mit>.

edu/22.033/ www/references/oleg/JPP_14_5_Kim.pdf. – 1.04.2016.

4. Pagnon, D. Control of the ceramic erosion by Optical Emission Spectroscopy: parametric studies of SPT100-ML [Электронный ресурс] / D. Pagnon, M. Touzeau, P. Lasgorceix // 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit AIAA04-3773. – 2004. – P. 1-10. – Режим доступа: <http://www2.lpgp.u-psud.fr/lpgpwww2008/propulsion/AIAA04-3773.pdf>. – 1.04.2016.

5. Shirasaki, A. Operational characteristics of cylindrical hall thrusters [Электронный ресурс] / A. Shirasaki, H. Tahara, T. Yoshikawa // 28th International Electric Propulsion Conference. – 2003. – 0051-0303. – P. 1-9. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_articledownload_1988-2007/2003index/0051-0303iepc-full.pdf. – 1.04.2016.

6. Thrust Performance and Plasma Characteristics of Low Power Hall Thrusters [Электронный ресурс] / H. Tahara, D. Goto, T. Yasui, T. Yoshikawa // 21st International Electric Propulsion Conference IEPC-01-042. – 2001. – P. 1-11. – Режим доступа: http://erps.spacegrant.org/uploads/images/images/iepc_article_download_1988-2007/2001index/42_6.pdf. – 1.04.2016.

7. Титов, М. Ю. Измерение зондовых характеристик в разрядном канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 8(125). – С. 82-88.

8. Middle power Hall Effect Thruster with centrally located cathode [Электронный ресурс] / A. V. Loyan, M. Y. Titov, O. P. Rybalov, T. A. Maksymenko // 33rd International Electric Propulsion Conference IEPC-2013-410. – 2013. – P. 1-8. – Режим доступа: <http://erps.spacegrant.org/index.php?page=2013-directory>. – 1.04.2016.

9. Loyan, A. Results of the study of the Hall Thruster type SPT-70 with centrally located cathode [Текст] / A. Loyan, M. Titov, E. Ischenko // XVII Міжнар. конгрес дигунобудівників : тез. доп. / М-во освіти та науки України, Нац. аерокосмічний ун-т ім. М. С. Жуковського «ХАІ». – Х., 2012. – С. 66.

10. Титов, М. Ю. Экспериментальный стенд и оборудование для исследования параметров плазмы в канале стационарного плазменного двигателя [Текст] / М. Ю. Титов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 7(124). – С. 121-125.

11. Титов, М. Ю. Расчет магнитной системы двигателя с анодным слоем малой мощности с учетом теплового состояния [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян, Т. А. Максименко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – № 8(85). – С. 94-98.

12. ГОСТ 11036-75. Сталь сортовая электро-техническая не легированная. Технические условия [Текст]. – Введ. 1977-01-01. – М. : Изд-во стандартов, 2003. – 5 с.

13. Преображенский, А. А. Магнитные мате-

риалы [Текст] / А. А. Преображенский. – М. : Высш. шк., 1965. – 234 с.

14. Титов, М. Ю. Численное моделирование магнитной системы Холловского двигателя мощностью до 100 Вт [Текст] / М. Ю. Титов, А. В. Лоян, В. А. Подгорный [Текст] // *Вестник двигателестроения*. – 2010. – № 2. – С. 73-78.

15. Стационарный плазменный ускоритель двигатель АТОН [Текст] / А. И. Морозов, А. И. Бугрова, А. В. Десятков [и др.] // *Физика плазмы*. – 1997. – Т. 23, № 7. – С. 635-645.

References

1. Blinov, N. V., Gorshkov, O. A., Shagayda, A. A. Experimental Investigation of Magnetic Field Topology Influence on Structure of Accelerating Layer and Performance of Hall Thruster. *29th International Electric Propulsion Conference*, 2005, pp. 1-10.

2. Gawron, D., Mazouffre, S., Sadeghi, N., Heron, A. Influence of magnetic field and discharge voltage on the acceleration layer features in a Hall effect thruster. *Plasma Sources Science and Technology*. 2008, vol. 17, no. 2, pp. 1-10. DOI : 10.1088/0963-0252/17/2/025001.

3. Kim, V., Main physical features and processes determining the performance of stationary plasma thrusters. *Journal of Propulsion and Power*. 1998, vol. 14, no. 5, pp. 736-743. DOI : 10.2514/2.5335.

4. Pagnon, D., Touzeau, M., Lasgorceix, P., Control of the ceramic erosion by Optical Emission Spectroscopy: parametric studies of SPT100-ML. *Proceedings of 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004, Fort Lauderdale, Florida, USA, pp. 1-10. DOI : 10.2514/6.2004-3773.

5. Shirasaki, A., Tahara, H., Yoshikawa, T. Operational characteristics of cylindrical hall thrusters. *Proceedings of 28th IEPC*, 2003, Toulouse, France, pp. 1-9.

6. Tahara, H., Goto, D., Yasui, T., Yoshikawa, T. Thrust Performance and Plasma Characteristics of Low Power Hall Thrusters *Proceedings of 27th IEPC*, Pasadena, California, USA, 2001, pp. 1-11.

7. Titov, M. Yu., Loyan, A. V. Izmerenie zondovykh kharakteristik v razryadnom kanale statsionarnogo plazmennogo dvigatelya [Measurements of probe characteristics in the discharge channel of stationary plasma thruster]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 8 (125), pp. 82-88.

8. Loyan, A., Titov, M., Rybalov, O. Maksymenko T., Middle power Hall Effect Thruster with centrally located cathode *Proceedings of 33rd IEPC*, 2013, Washington, DC, USA, pp. 1-8.

9. Loyan, A., Titov, M., Ischenko, E. Results of the study of the Hall Thruster type SPT-70 with centrally located cathode. *XVII Mizhnar. konhres dyhuno-budivnykyv : tez. dop. – Proc. 17th Int. congress of propulsion engineering*. Kharkiv, 2012, pp. 66.

10. Titov, M. Yu., Eksperimental'nyi stend i oborudovanie dlya issledovaniya parametrov plazmy v kanale statsionarnogo plazmennogo dvigatelya

[Experimental stand and equipment for investigation of plasma parameters inside SPT channel]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2015, no. 7 (124), pp. 121-125.

11. Titov, M. Y., Loyan, A. V., Maksimenko, T. A. Raschet magnitnoi sistemy dvigatelya s anodnym sloem maloi moshchnosti s uchetom teplovogo sostoyaniya [Computation of magnetic system of low-power anode layer thruster taking into account thermal conditions]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2011, no 8 (85), pp. 94-98.

12. GOST 11036-75. Stal' sortovaya elektro-tekhnicheskaya nelegirovannaya. Tekhnicheskie usloviya [Electrotechnical quality unalloyed steel. Specification]. Moscow, Standartinform Publ., 2003. 5 p.

13. Preobrazhenskii, A. A. *Magnitnye materialy* [Magnetic materials]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1965. 234 p.

14. Titov, M. Y., Loyan, A. V., Podgornyi, V. A., Fedotenko, V. A. Chislennoe modelirovanie magnitnoi sistemy Khollovskogo dvigatelya moshchnost'yu do 100 Vt [Numerical modeling of magnetic system for hall thruster with power up to 100 W]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2010, no. 2, pp. 73-78.

15. Morozov, A. I., Bugrova, A. I., Desyatskov A. V., Statsionarnyi plazmennyi uskoritel' dvigatel' ATON [ATON stationary plasma thruster]. *Fizika plazmy*, 1997, vol. 23, no. 7, pp. 635-645.

Поступила в редакцию 12.04.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, доц., доц. кафедры теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем Ю. А. Сысоев, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУМІВ У КОТУШКАХ МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА НА РОЗПОДІЛ МАГНІТНОГО ПОЛЯ В РОЗРЯДНОМУ КАНАЛІ

М. Ю. Тітов

У даній роботі наведені результати розрахунків магнітного поля стаціонарного плазмового двигуна типу М70 для різних струмів котушок намагнічування. Розрахунки виконані в пакеті МСЕ моделювання Ansoft Maxwell 14.0. Завдання розрахунку магнітного поля було вирішене за допомогою двомірної еквівалентної схеми магнітної системи двигуна. Вплив струмів внутрішньої і зовнішніх котушок розглянуто окремо. Зроблено висновки про вплив на радіальну складову індукції магнітного поля в розрядному каналі двигуна. Показано вплив струмів в котушках на профіль силових магнітних ліній.

Ключові слова: стаціонарний плазмовий двигун, магнітна система, котушка намагнічування.

INVESTIGATION OF MAGNETIZATION COIL CURRENT INFLUENCE ON DISTRIBUTION OF MAGNETIC FIELD IN DISCHARGE CHANNEL OF STATIONARY PLASMA THRUSTER

M. Yu. Titov

This paper presents the results of magnetic field calculations in the stationary plasma thruster M70-type for different magnetization coils currents. Calculations are performed in the FEM simulation package Ansoft Maxwell 14.0. The problem was solved by the magnetic field calculation using the two-dimensional equivalent scheme of thruster magnetic system. Influence of currents in internal and external coils is considered separately. The conclusions of the influence on the magnetic field radial component in the discharge channel of the thruster are done. The influence of the currents in the coils on the profile of magnetic force lines is shown.

Key words: stationary plasma thruster, magnetic system, the magnetizing coil.

Тітов Максим Юрьевич – аспірант каф. 402 Національного Аерокосмічного Університета ім. Н. Е. Жуковського «ХАИ», Харків, Україна, e-mail: titov@khai.edu

Titov Maksym Yurevich – PhD student, 402 department, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: titov@khai.edu