

## ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОЛЬЦЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, СОБРАННЫМИ ПО УПРОЩЕННОЙ СХЕМЕ ХАЛЬБАХА, ПО КРИТЕРИЮ ОТНЕСЕННОЙ К ОБЪЕМУ ОСЕВОЙ СИЛЫ

А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова

*Двигатели-маховики широко применяются в качестве исполнительных органов систем ориентации и стабилизации малых и средних космических аппаратов. Проведена оптимизация вариантов кольцевого двигателя-маховика прямоугольного поперечного сечения с постоянными магнитами, собранными по упрощенной схеме Хальбаха, в сравнении с предложенной ранее конструкцией кольцевого двигателя-маховика круглого поперечного сечения. Критерием сравнения выбрана удельная по объему осевая электромагнитная сила. Расчеты проведены с применением метода конечных элементов. Рассматривались варианты кольцевого двигателя-маховика с различными величинами полюсных делений, ширинами и высотами постоянных магнитов. При этом сохранялся ток обмотки статора. В результате получено, что удельная по объему сила у кольцевого двигателя-маховика круглого сечения лучше, чем у любого вновь рассчитанного варианта прямоугольного сечения соизмеримого объема. Однако, конструкция ротора кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения позволяет, не меняя геометрии статора, увеличивать его момент инерции, что позволяет развивать аналогичный управляющий момент при меньшем угловом ускорении.*

**Ключевые слова:** кольцевой двигатель-маховик, постоянные магниты, упрощенная схема Хальбаха.

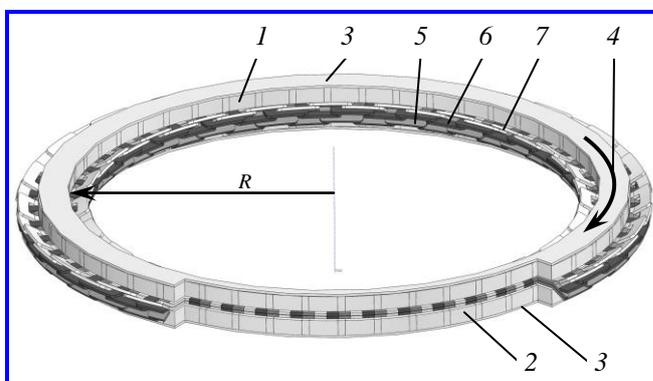
Наряду с традиционной схемой сборки магнитов ротора с чередованием явно выраженных полюсов «Север – Юг» распространение получила также схема сборки Хальбаха. Ее применение, как правило, позволяет повысить значение магнитной индукции в воздушном зазоре и отказаться от ярма (или ярем) ротора, что, в свою очередь, дает возможность получить большее значение электромагнитной силы, отнесенной к объему электромашины. Недостатком применения схемы Хальбаха является сложность ее изготовления и, соответственно, высокая стоимость. Известно несколько разновидностей схемы Хальбаха. В этой статье упрощенной схемой Хальбаха названа схема сборки постоянных магнитов, в которой чередуются вектора намагниченности в радиальном направлении и в тангенциальном направлении, включая и направления, обратные указанным. Упрощенная схема Хальбаха позволяет удешевить конструкцию кольцевого двигателя-маховика (КДМ) по сравнению с обычной схемой Хальбаха.

Конструкция-аналог КДМ круглого сечения, предложенная в патенте [1], обладает высоким значением удельной по длине электромагнитной силы, за счет оптимального выбора ширины полюсного деления, ширины ферромагнитной вставки и ширины постоянного магнита ротора при оптимальном числе пазов на полюс и фазу [2]. Недостатком предложенного в диссертационной работе [3] КДМ является недоступность ротора без демонтажа обмотки, что ухудшает ремонтпригодность КДМ.

Целью данной статьи является выбор наилучшего варианта кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения, возбуждаемого от упрощенной магнитной сборки Хальбаха (рис. 1 и 2), в сравне-

нии с вариантом КДМ круглого сечения, предложенным в диссертационной работе [3]. Критерием сравнения выбрана удельная по объему осевая сила, которую необходимо максимизировать.

Постоянные магниты верхнего 1 и нижнего 2 индукторов ротора прикреплены к ярмам 3 (рис. 1 и 2). Направление движения ротора отмечено стрелкой 4. Направление намагниченности упрощенных сборок Хальбаха на верхнем и нижнем индукторах согласованы так, чтобы магнитный поток, созданный постоянными магнитами сборок Хальбаха верхнего и нижнего индукторов, складывался. Магнитный поток каждого постоянного магнита 1 и 2 проходит через воздушный зазор  $\delta$  и сцеплен с обмотками фаз статора 5 (темные катушки), 6 (серые катушки) и 7 (светлые катушки). За счет вышеописанной последовательности чередования направления вектора намагниченности постоянных магнитов магнитный поток не выходит за внешние пределы верхнего индуктора 1 и не попадает ниже нижнего индуктора 2. Поэтому наличие магнитного материала для ярма 3 ротора не требуется. Ярма 3 нужны только для крепления постоянных магнитов.



**Рис. 1. Активная часть линейной магнитоэлектрической машины в кольцевом торцевом исполнении**

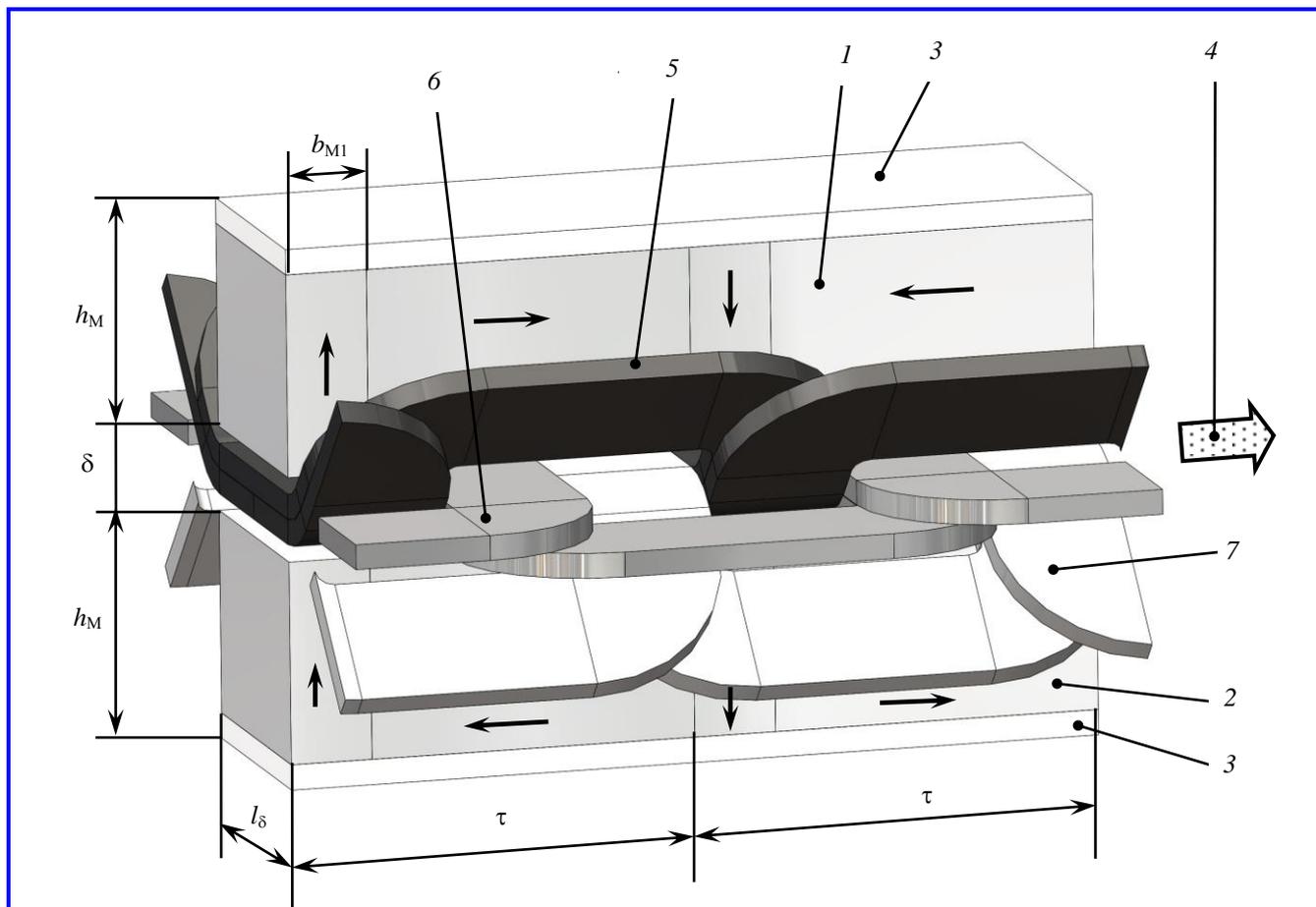


Рис. 2. Фрагмент активной части кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения

На рис. 2 обозначены:  $h_M$  – высота постоянного магнита;  $b_{M1}$  – ширина постоянного магнита, намагниченного вдоль оси  $Y$ ;  $l_\delta$  – активная длина КДМ;  $\tau$  – полюсное деление.

Применён материал магнитов неодим-железобор NdFeB, марки N40UH (коэрцитивная сила  $H_c = 900$  кА/м), материал катушек – медь, в зазорах между статором и ротором – воздух. Стрелками на рис. 2 показаны направления намагниченности постоянных магнитов. Хотя КДМ является кольцом, его кривизна в расчетной модели не учитывалась, поскольку диаметр кольца ротора КДМ обычно значительно превышает диаметр постоянных магнитов.

Для обеспечения возможности адекватного сравнения электромагнитной силы КДМ, согласно рис. 2, и КДМ, описанного в [3], в обоих вариантах приняты одинаковые:

- 1) величина воздушного зазора  $\delta = 1,5$  мм;
- 2) ток якоря  $I = 77,8$  А.

**Расчетная модель.** Двумерная расчетная модель (рис. 3) построена с использованием метода конечных элементов в программном комплексе

Ansys Maxwell 16. При построении расчетной модели установлены граничные условия:

- за границы отрезков  $A_1A_2$  и  $A_3A_4$  магнитное поле не выходит (векторный магнитный потенциал равен нулю);
- магнитные индукции на отрезках  $A_1A_4$  и  $A_2A_3$  равны.

Размер  $\delta_1$  (рис. 3) моделирует затухание магнитного поля за границей КДМ, он выбран минимально возможным, но чтобы его величина практически (менее 0,5%) не оказывала влияния на значение осевой силы.

На рис. 3 рассмотрен случай, когда второе условие реализовано в модели при одинаковой площади поперечного сечения каждой катушки обмотки статора  $h_{o6} \times b_{o6} = 13,9$  мм<sup>2</sup>, при этом плотность тока в катушке  $J = 5,6$  А/мм<sup>2</sup>. Направление тока в обмотке согласовано с положением ротора: в катушках фаз А+, А–, С+, С– задана плотность тока  $J = 5,6$  А/мм<sup>2</sup>, в катушках фазы В – плотность тока  $J = 0$  – отмечена зелёным цветом.

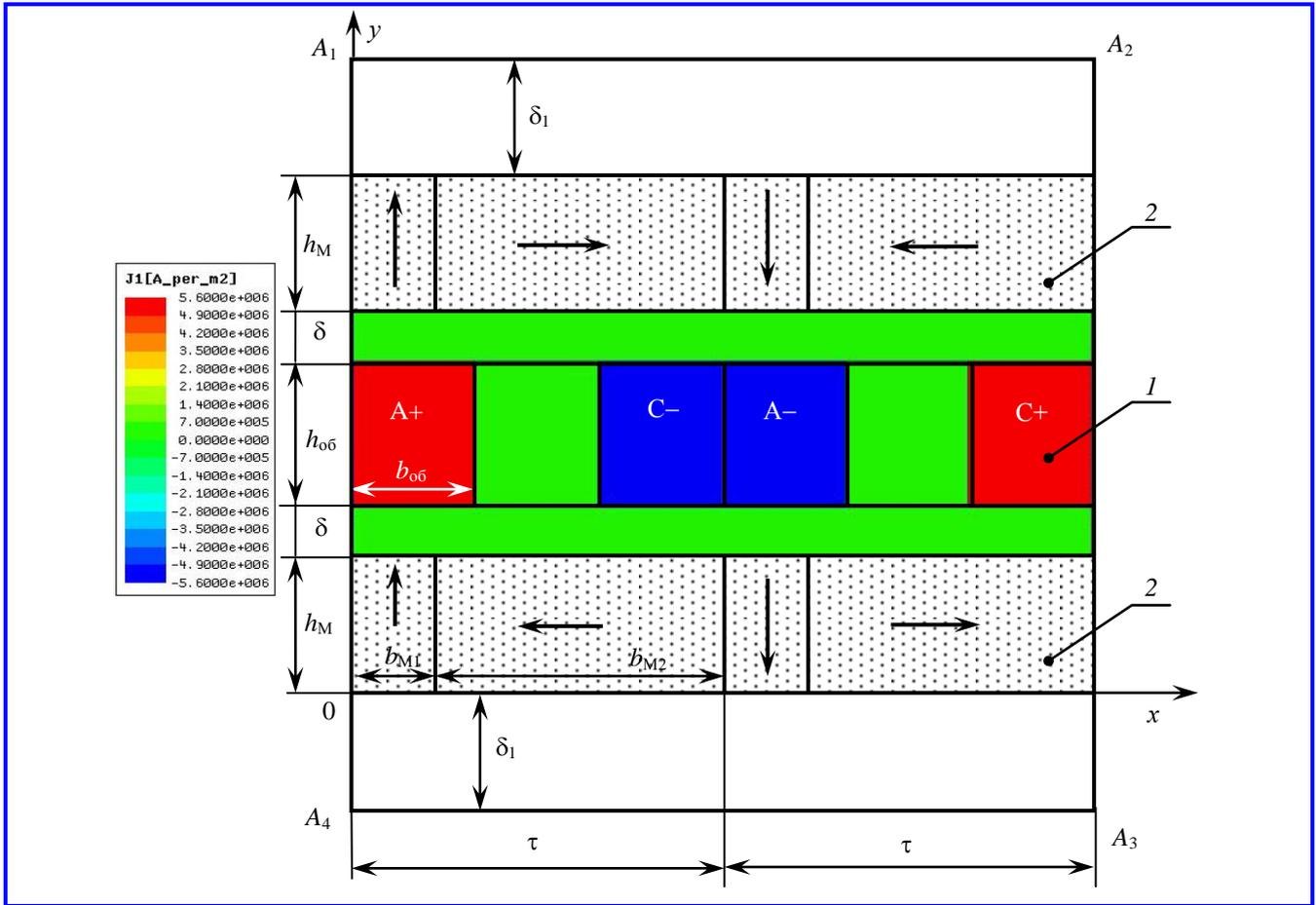


Рис. 3. Расчетная модель кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения с возбуждением от постоянных магнитов, собранных по упрощенной схеме Хальбаха: 1 – статор; 2 – ротор

Высота и ширина постоянных магнитов варьировались в соответствии с табл. 1. При этом полюсное деление  $\tau$  изменялось в пределах 10 – 14 мм. Диапазоны варьирования выбраны такими, чтобы исходя из предыдущих расчетов обеспечить достижение экстремума электромагнитной силы, отнесенной к объему.

В результате расчетов для каждого ряда  $h_M$  для фиксированного значения  $b_M$  должен быть найден экстремум электромагнитной силы, отнесенной к объему  $F_x/V$ .

Следует отметить, что объем лобовых частей обмотки был рассчитан в предположении, что каждая из них представляет собой полукольцо квадратного сечения, равного сечению катушки. При этом объем КДМ рассчитывался по формуле:

$$V = 2\tau l_\delta (2h_M + 2\delta + h_{об}) + \pi\tau^2 h_{об},$$

где  $l_\delta$  – активная длина КДМ, то есть «глубина» модели в направлении оси Z, направленной перпендикулярно плоскости рис. 3.

Следует также отметить, что при рассматриваемой упрощенной схеме Хальбаха:

$$\tau = b_{M1} + b_{M2}.$$

**Результаты расчетов.** В результате проведенных расчетов получено распределение магнитной индукции. В качестве примера картина поля магнитной индукции  $\mathbf{B}$  показана на рис. 4.

Результаты расчета электромагнитной силы на единицу объема  $F_x/V$  приведены на рис. 5. Точками на графиках отмечены расчетные значения.

Зависимость осевой силы, отнесенной к объему  $F_x/V$ , от ширины постоянного магнита  $b_{M1}$  достигала

Таблица 1

Варьируемые величины		
Величина	Диапазон варьирования, мм	Шаг варьирования, мм
Высота постоянных магнитов, $h_M$	4 – 6	1
Ширина постоянных магнитов, $b_{M1}$	1 – 4	0,5 – 1

ет наибольших значений при высоте постоянного магнита  $h_M = 4$  мм,  $b_{M1} = 2$  мм,  $\tau = 12$  мм (рис. 5, б).

Сравнение результатов расчета осевой электромагнитной силы  $F_x$ , отнесённой к объёму  $V$ , для наилучшего рассчитанного варианта КДМ и КДМ согласно [3], приведено в табл. 2. Из анализа табл. 2 видно, что электромагнитная сила на единицу объёма  $F_x/V$  у КДМ круглого сечения, описанного в [3], лучше, чем у любого вновь рассчитанного варианта с  $l_\delta = 25$  мм, по крайней мере, на 7,9%. При этом объём КДМ круглого сечения на длине полюсного деления на 30% меньше.

Следует отметить, что в расчётных вариантах длина  $l_\delta$  принята равной 25 мм, для того, чтобы объёмы рассчитанных вариантов и прототипа [3] были соизмеримы. Анализ влияния активной длины КДМ  $l_\delta$  на значение осевой силы приведён на рис. 6.

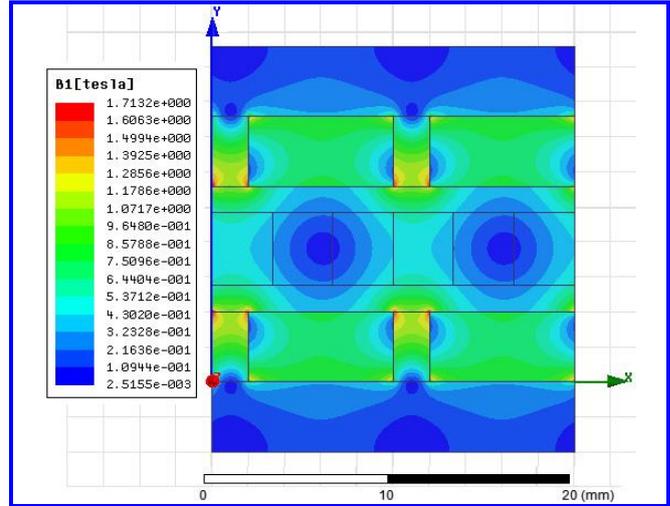


Рис. 4. Картина поля магнитной индукции  $B$  для варианта с  $h_M = 4$  мм,  $b_{M1} = 2$  мм,  $\tau = 10$  мм

Таблица 2

**Сравнение результатов расчета электромагнитной силы для кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения с кольцевым двигателем-маховиком круглого сечения**

	Кольцевой двигатель-маховик прямоугольного сечения, рассчитанный в данной статье	Кольцевой двигатель-маховик круглого сечения, согласно [3]	Различие, %
Высота постоянного магнита $h_M$ , мм	4	–	–
Ширина постоянного магнита $b_{M1}$ , мм	2	–	–
Полюсное деление $\tau$ , мм	12	13,9	
Высота катушки обмотки $h_{об}$ , мм	3,48	3	
Ширина катушки обмотки $b_{об}$ , мм	4,0	–	
Расчет электромагнитной силы на единицу объёма $F_x/V$ , кН/м <sup>3</sup> , максимум	341	368	7,9%
Объём кольцевого двигателя-маховика на длине полюсного деления, мм <sup>3</sup>	5 128,5	3 941,0	30%

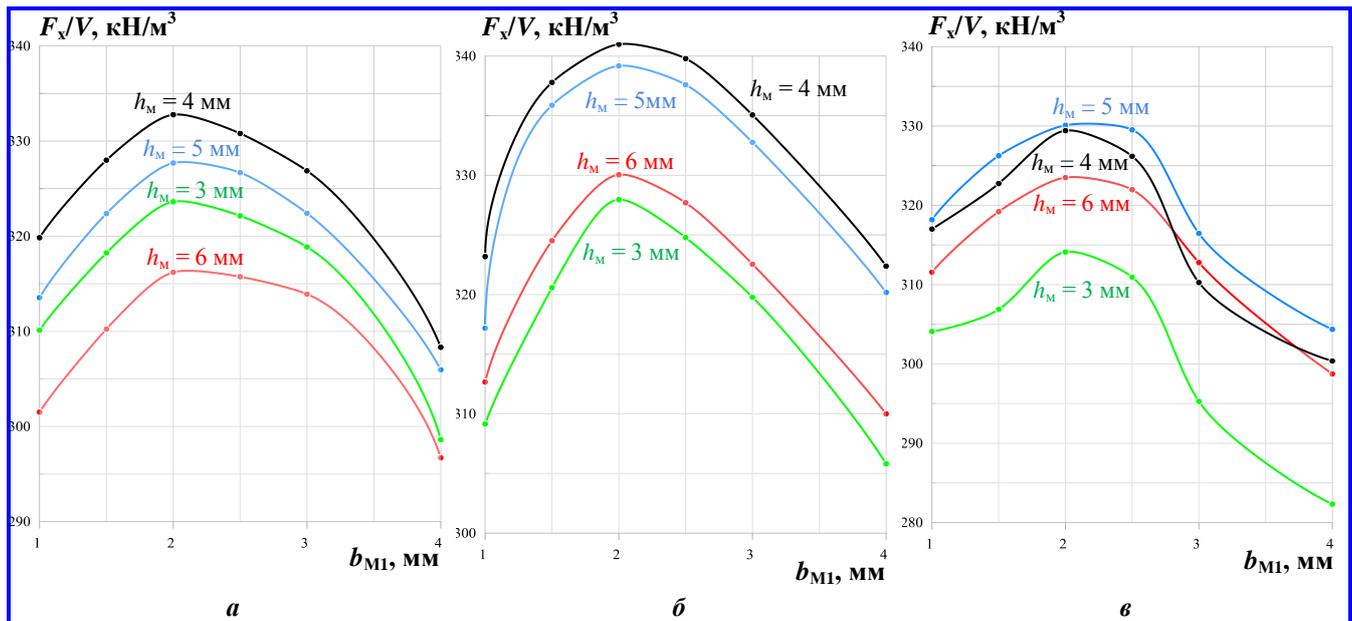


Рис. 5. Зависимость осевой силы, отнесённой к объёму  $F_x/V$ , от ширины постоянного магнита  $b_{M1}$  при ширине полюсного деления  $\tau$ : а – 10 мм; б – 12 мм; в – 14 мм

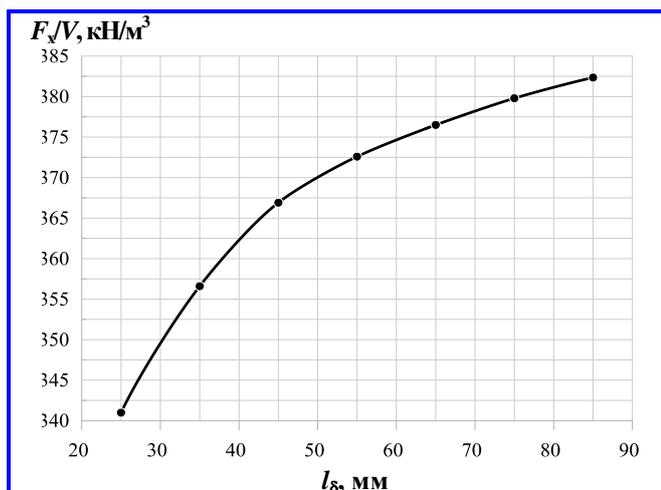


Рис. 6. Оценочная зависимость осевой силы, отнесённой к объёму  $F_x/V$ , от активной длины машины  $l_{\delta}$

Несмотря на то, что корректно сравнивать машины соизмеримого объёма, была проведена *оценка* влияния величины активной длины КДМ  $l_{\delta}$  на  $F_x/V$ . При этом принималось во внимание, что величина силы  $F_x$  прямо пропорциональна активной длине машины  $l_{\delta}$ , краевой эффект не учитывался. Результаты расчета приведены на рис. 6. Из рисунка видно, что с ростом активной длины лобовые части играют всё меньшую роль в объёме КДМ, что приводит к увеличению удельной силы. При  $l_{\delta} = 55$  мм  $F_x/V = 372,09$  кН/м<sup>3</sup>, что больше чем у прототипа, приведённого в [3]. Дальнейшее увеличение  $l_{\delta}$  приводит к ещё большему увеличению  $F_x/V$ .

#### Выводы

1. Предложенный КДМ прямоугольного сечения значительно проще с точки зрения установки

Поступила в редакцию 29.07.2024

*Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, доцент, начальник отдела, т. (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.*

*Нина Андреевна Белокурова, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, т. (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru. (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)*

## OPTIMAL DESIGN OF RING-SHAPED REACTION WHEEL WITH THE PERMANENT MAGNETS ASSEMBLED IN COMPLIANCE WITH SIMPLIFIED HALBACH SCHEME ACCORDING TO THE CRITERION OF AXIAL FORCE RELATED TO THE VOLUME

A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova

*Reaction wheels are widely used as actuating elements of the attitude control systems for small and medium spacecrafts.*

*Optimization of variants of rectangular cross section ring-shaped reaction wheel with the permanent magnets assembled in compliance with simplified Halbach scheme in comparison with the design of circular cross section ring-shaped reaction wheel, presented earlier, has been*

статора в КДМ и обладает лучшей ремонтпригодностью. Поскольку в предложенной конструкции имеется доступ к ротору, в отличие от КДМ круглого сечения, данная конструкция ротора позволяет увеличивать его момент инерции, не меняя геометрии статора.

2. Удельная по объёму сила у вновь рассчитанного варианта КДМ прямоугольного сечения с постоянными магнитами, собранными по упрощённой схеме Хальбаха, хуже на 7,9%, чем КДМ круглого сечения, оптимизированного в [3]. Однако с учетом преимущества п. 1 это ухудшение не является существенным и КДМ прямоугольного сечения найдет применение.

#### Литература

1. Патент на изобретение № 2650178 Российская Федерация, МПК H02K 21/14(2006.01), H02K 7/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Двигатель-маховик : № 2017131262 : заявл. 06.09.2017 : опубл. 11.04.2018 / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, И. Ю. Пугач, Н. А. Белокурова, Н. А. Красова. – Бюл. № 11. – 13 с.
2. Белокурова, Н. А. Влияние ширины магнита, ширины магнитной вставки и величины воздушного зазора на характеристики двигателя-маховика кольцевой конструкции / Н. А. Белокурова, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2021. – Т. 180. – № 1. – с. 3 – 9.
3. Белокурова, Н. А. Кольцевой двигатель-маховик с повышенными удельными показателями : специальность 02.04.02 «Электротехнические комплексы и системы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Н. А. Белокурова ; [Научно-производственная корпорация «Космические системы мониторинга, информационно-управляющие и электромеханические комплексы» им. А. Г. Иосифьяна (АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)]. – Москва, 2022. – 135 с.

performed. The specific axial electromagnetic force in terms of volume was selected as the comparison criterion. The calculations were performed using the finite element method. Variants of ring-shaped reaction wheel with different values of polar pitches, widths and heights of permanent magnets were considered. At the same time, the current of the stator winding was maintained. As a result it was obtained that the specific force of circular cross section ring-shaped reaction wheel in terms of volume is better than any newly calculated variant of rectangular cross section of a commensurate volume. However, the design of rotor of rectangular cross section ring-shaped reaction wheel allows increasing the inertia moment without changing the stator geometry which allows developing a similar control moment with less angular acceleration.

**Key words:** ring-shaped reaction wheel, permanent magnets, simplified Halbach scheme.

### References

1. Patent for invention No. 2650178 Russian Federation, IPC H02K 21/14(2006.01), H02K 7/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Reaction wheel : No. 2017131262 : appl. 06.09.2017 : published 11.04.2018 / V. Ya Gecha, A. B. Zakharenko, I. Yu Pugach, N. A. Belokurova, N. A. Krasova. – Bul. No. 11. – 13 p.
2. Belokurova, N. A. Impact of magnet width, ferromagnetic insert width and air gap size on characteristics of a ring-shaped reaction wheel / N. A. Belokurova, A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – 2021. – Vol. 180. – No. 1. – P. 3 – 9.
3. Belokurova, N. A. Ring-shaped reaction wheel with the increased specific indicators: speciality 02.04.02 «Electrotechnical complexes and systems»: Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences / N. A. Belokurova; [Research and Production Corporation «Space Monitoring Systems, Information & Control and Electromechanical Complexes» named after A. G. Iosifian» (JSC «VNIEM Corporation»)]. – Moscow, 2022. – 135 p.

*Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department,  
t. +7 (495) 366-26-44, e-mail: otde118@mcc.vniem.ru.*

*Nina Andreevna Belokurova, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy Head of Department,  
t. +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniem.ru.  
(JSC «VNIEM Corporation»).*