

## ВЫБОР СХЕМЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ РОТОРА КОЛЬЦЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА

Н. А. Белокурова, А. Б. Захаренко

*Двигатели-маховики широко применяются в качестве исполнительных органов систем ориентации и стабилизации средних и малых космических аппаратов. В данной работе проведено сравнение двух вариантов роторов кольцевых двигателей-маховиков: с традиционной осевой схемой намагничивания с ферромагнитной проставкой между постоянными магнитами и схемой намагничивания Хальбаха. Критерием сравнения выбрана максимальная удельная по длине сила. При этом сравнивались кольцевые двигатели-маховики, имеющие оптимизированную по тому же критерию ширину осевого магнита. Для кольцевого двигателя-маховика с разными схемами намагничивания ротора максимальной удельной силе соответствуют разные ширины осевого магнита. Электромагнитные расчеты проведены с применением метода конечных элементов. Полученные результаты позволяют сделать выбор схемы намагничивания для ротора кольцевого двигателя-маховика.*

**Ключевые слова:** кольцевой двигатель-маховик, постоянные магниты, магнитная индукция, схема намагничивания, схема Хальбаха.

Новая конструкция кольцевого двигателя-маховика (КДМ), предложенная в патенте [1], имеет хорошие показатели, в том числе электромагнитную силу, за счет оптимального выбора ширины полюсного деления, ширины ферромагнитной вставки и ширины постоянного магнита ротора при оптимальном числе пазов на полюс и фазу [2]. Представляет интерес улучшение этого показателя за счет оптимального выбора схемы намагничивания (СН) постоянных магнитов ротора. Кроме традиционной СН наибольшее распространение получила схема Хальбаха [3 – 5]. Ее применение, как правило, позволяет повысить значение магнитной индукции в воздушном зазоре, а увеличение магнитной индукции в свою очередь позволяет получить большее значение электромагнитной силы  $F_3$ :

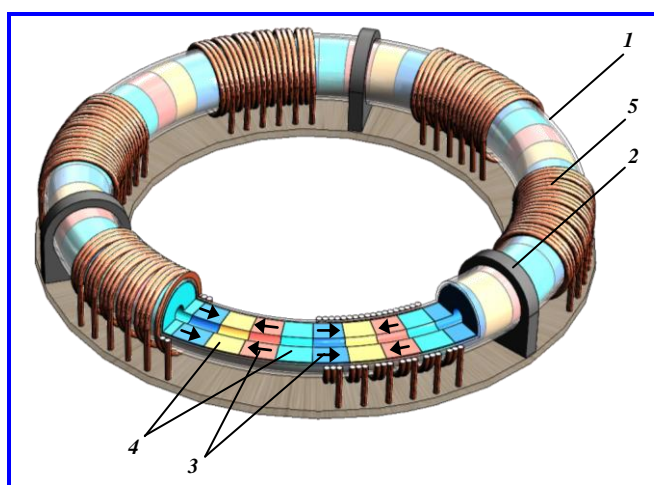
$$F_3 \sim B_\delta \cdot A \cdot S_\delta,$$

где  $B_\delta$  – амплитуда индукции в зазоре;  $A$  – линейная токовая нагрузка;  $S_\delta$  – площадь активной зоны машины.

**Целью** данной статьи является выбор СН постоянных магнитов ротора КДМ между двумя вариантами: традиционной и схемой Хальбаха. При этом сравниваются КДМ с различными ширинами магнитов для разных СН, соответствующими наибольшим значениям удельной силы. Прочие параметры магнитных систем сравниваемых КДМ одинаковы.

### Описание конструкции кольцевого двигателя-маховика

Конструкция КДМ представлена на рис. 1. Ротор представляет собой тор, собранный из следующих элементов: постоянные магниты 3 чередующейся полярности, намагниченные в осевом направлении, и ферромагнитные проставки 4 между магнитами.



**Рис. 1. Конструкция кольцевого двигателя-маховика:** 1 – трубка; 2 – опоры; 3 – постоянные магниты осевого намагничивания; 4 – ферромагнитные проставки; 5 – катушки

Стрелками на рис. 1 показано направление намагничивания постоянных магнитов. Ротор маховика располагается в полой трубке 1 и может свободно вращаться внутри нее. На поверхности трубки намотаны катушки 5 трехфазной обмотки.

### Расчетные модели

Для достижения поставленной цели были построены расчетные модели с двумя вариантами роторов с различными СН: традиционной и по схеме Хальбаха. Для второго варианта вместо ферромагнитных проставок между магнитами с осевым намагничиванием используются радиально намагниченные постоянные магниты. Решение задач проводилось методом конечных элементов в программном комплексе Ansys Maxwell 16 при трехмерной постановке задачи. Сечения расчетных моделей приведены на рис. 2. Хотя ротор КДМ является тором, его кривизна в расчетной модели не учитывалась, поскольку диаметр тора ротора КДМ обычно

значительно превышает диаметр постоянных магнитов. Для обоих вариантов расчетной модели геометрия магнитов, вставок и катушек абсолютно одинакова. Различие моделей заключается лишь в материале вставок: для традиционной схемы – сталь 3; для схемы Хальбаха – радиально намагниченные постоянные магниты. Стрелками (см. рис. 2) обозначены направления намагничивания постоянных магнитов. Материал магнитов – неодим-железобор NdFeB (коэрцитивная сила  $H_c = 890$  кА/м); материал катушек – медь; окружающая среда – воздух. Геометрические размеры: полюсное деление  $\tau = 14$  мм, величина воздушного зазора  $\delta = 1,1$  мм, диаметр магнитов  $d_m = 10$  мм, высота катушек  $h_k = 3$  мм, ширина магнита  $b_m$  варьировалась от 1 до 13 мм с шагом 2 мм. Граничные условия: магнитное поле на одном торце расчетной модели по величине и направлению повторяет магнитное поле на другом торце, что имитирует цикличность магнитной системы, а также второе граничное условие: векторный магнитный потенциал равен нулю на границах расчетной зоны, расположенных параллельно оси  $OZ$ . В катушках A+, A-, C+, C- задана плотность тока  $J = 6,8$  А/м, при этом знак «+» обозначает, что направление тока в катушке принято против часовой стрелки, а знак «-» – по часовой стрелке.

**Результаты расчета**

На рис. 3 показаны примеры результатов расчетов: картины магнитной индукции ротора для вариантов ротора традиционной СН и со СН Хальбаха. На рис. 4 показано распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль воздушного зазора по линии, проходящей через центр катушек, для обоих вариантов СН при переменной ширине магнита от 7 до 13 мм с шагом 2 мм.

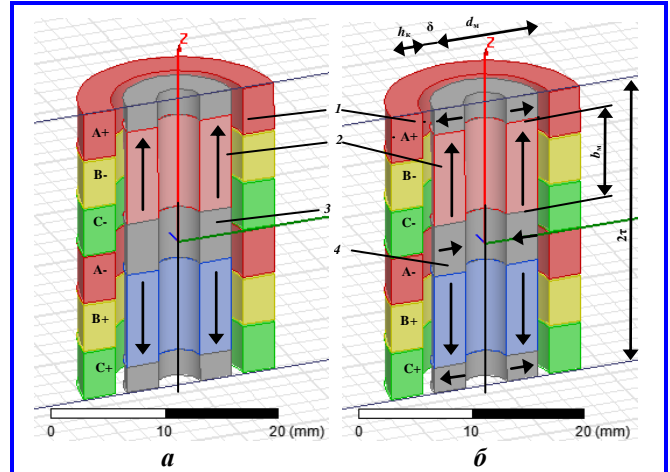


Рис. 2. Сечения расчетных моделей кольцевых двигателей-маховиков с ферромагнитными вставками (а) и с магнитной системой, намагниченной по схеме Хальбаха (б): 1 – катушки; 2 – постоянные магниты осевого намагничивания; 3 – ферромагнитные вставки; 4 – постоянные магниты радиальной намагниченности

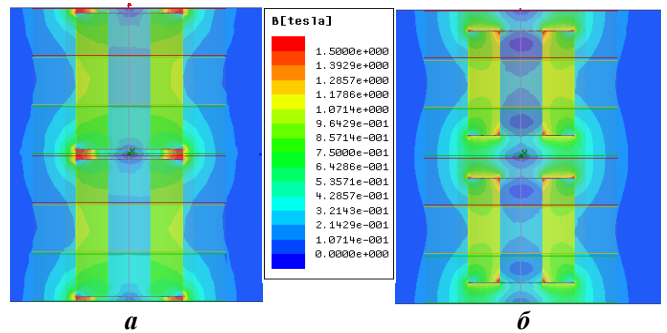


Рис. 3. Картина магнитной индукции ротора в продольном сечении для варианта ротора с традиционной схемой намагничивания (а) и по схеме Хальбаха (б)

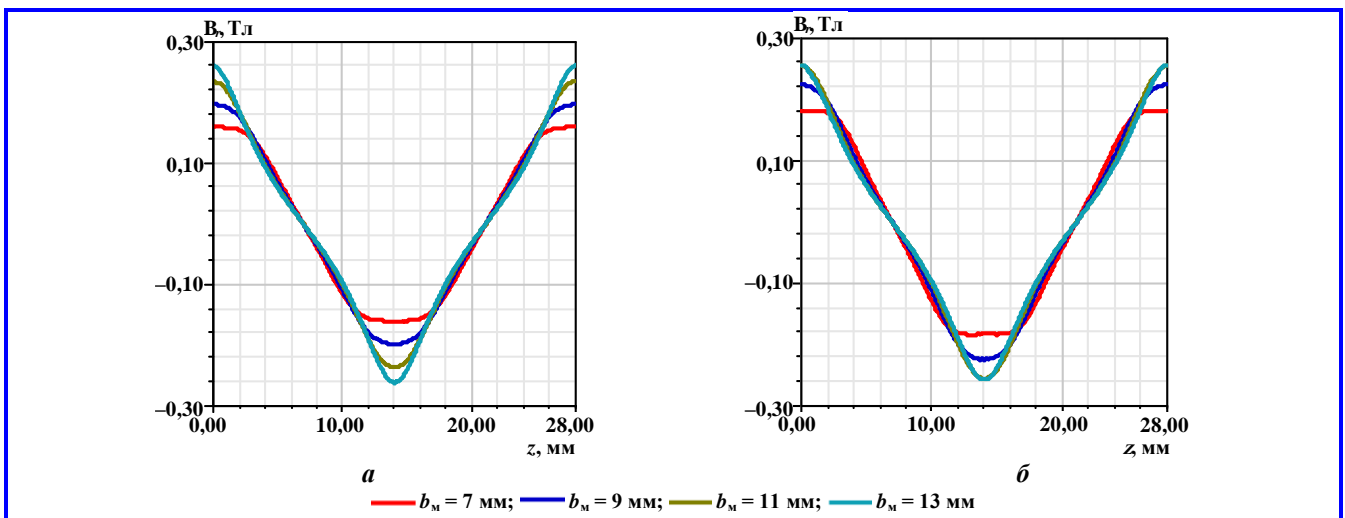


Рис. 4. Распределение нормальной составляющей магнитной индукции вдоль воздушного зазора по линии, проходящий через центр катушек, с традиционной схемой намагничивания (а) и по схеме Хальбаха (б)

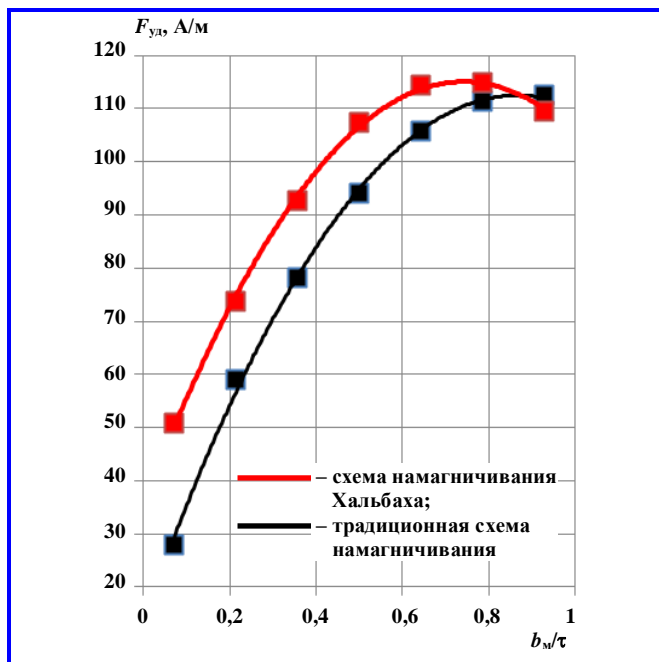


Рис. 5. Зависимость осевой силы на единицу длины от отношения  $b_m/\tau$ : квадратами и ромбами показаны расчетные точки

Таблица

Значения удельных сил для кольцевых двигателей-маховиков с традиционной схемой намагничивания и схемой намагничивания Хальбаха

	$d_m = 10 \text{ мм}$		$d_m = 20 \text{ мм}$	
	традиционная	Хальбаха	традиционная	Хальбаха
$b_m, \text{ мм}$	10	13	10	13
$F_{уд}, \text{ Н/м}$	105,7	113,7	321,5	349,0

Для обоих вариантов расчетных моделей были также получены значения удельных сил по длине машины  $F_{уд}$ , Н/м:

$$F_{уд} = F/2\tau.$$

Результаты расчетов приведены на рис. 5 и в таблице. Из графика видно, что для каждой СН существует свое оптимальное значение ширины магнита, соответствующее максимальной удельной силе. При этом сравнение КДМ необходимо производить для машин с оптимизированным значением ширины магнита.

Выигрыш от использования СН Хальбаха относительно традиционной СН составляет менее 2%. Аналогичное исследование было проведено для КДМ с диаметром магнитов  $d_m = 20 \text{ мм}$  и  $\tau = 20 \text{ мм}$ . Результаты приведены в таблице. При-

рост удельной силы при использовании СН Хальбаха также составил не более 2%. Тем не менее при создании ротора с тонкой ферромагнитной проставкой необходимо преодолеть технологическую сложность сборки, возникающую из-за расталкивающих сил взаимодействия соседних магнитов, либо использовать проставку большей толщины, что приведет к снижению значения удельной силы. При использовании СН Хальбаха подобная проблема отсутствует. Если сравнивать КДМ с традиционной СН, но с шириной осевого магнита, соответствующей оптимизированной КДМ с СН Хальбаха, то применение СН Хальбаха позволит повысить удельную силу практически на 10%.

### Выводы

1. Максимум удельной силы по длине для КДМ с разными СН достигается при разных отношениях  $b_m/\tau$ .
2. При сравнении КДМ, имеющего традиционную СН и ширину осевого магнита, соответствующую ширине оптимизированного КДМ с СН Хальбаха, прирост удельной силы КДМ от применения СН Хальбаха относительно традиционной СН составляет около 10%.
3. При сравнении КДМ, имеющих разные СН и оптимизированную ширину магнита по удельной силе, прирост удельной силы КДМ от применения СН Хальбаха относительно традиционной СН составляет менее 2%.

### Литература

1. Патент на изобретение РФ № 2650178 С1, МПК Н02К 21/14, Н02К 7/02, Н02К 1/27. Двигатель-маховик : № 2017131262 : заявл. 06.09.2017 : опубл. 11.04.2018/ Геча В. Я., Захаренко А. Б., Пугач И. Ю., Белокурова Н. А., Красова Н. А. – 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. Геча В. Я. Проектирование электромашин с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха / В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2020. – Т. 177. – № 4 – С. 3–10.
4. Jang S. M., Lee Sung-Ho. Comparison of two types of PM linear synchronous servo and miniature motor with air-cored film coil / S. M. Jang, Sung-Ho Lee // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – Vol. 38. – No. 5. – P. 3264–3266.
5. Electromagnetic Design of Toroidal Permanent Magnet Linear Synchronous Motor / Y. Mao, Z. Sun, W. Zhou [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 98005–98012. – DOI : 10.1109/ACCESS.2021.3095912.

Поступила в редакцию 07.02.2023

*Нина Андреевна Белокурова*, кандидат технических наук, начальник сектора,  
т. (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.

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

## SELECTION OF MAGNETIZATION SCHEME FOR RING-SHAPED REACTION WHEEL ROTOR

**N. A. Belokurova, A. B. Zakharenko**

*Reaction wheels are widely used as actuating elements of the attitude and orbit control systems for medium and small spacecraft. The present article provides comparison of two options of ring-shaped reaction wheel rotors: with a traditional axial magnetization scheme with a ferromagnetic insert between permanent magnets and the Halbach magnetization scheme. The maximum specific lengthwise force was selected as a criterion for comparison. Ring-shaped reaction wheels with an axial magnet width optimized on the basis of the same criterion were compared. For a ring-shaped reaction wheel with various rotor magnetization schemes, various widths of axial magnet correspond to the maximum specific force. The electromagnetic calculations were performed using the finite element method. The received results allow the selection of magnetization scheme for a ring-shaped reaction wheel.*

**Key words:** ring-shaped reaction wheel, permanent magnets, magnetic induction, magnetization scheme, Halbach scheme.

### References

1. Patent for invention of the Russian Federation No. 2650178 C1, IPC H02K 21/14, H02K 7/02, H02K 1/27. Reaction wheel : No. 2017131262 : appl. dated 06.09.2017 : publ. on 11.04.2018 / Gecha V. Ia., Zakharenko A. B., Pugach I. Iu., Belokurova N. A., Krasova N. A. – Bul. No. 11. – p. 13.
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. – V. 180. – No. 1. – P. 3–9.
3. Gecha V. Ia. Designing an electrical machine with permanent magnets magnetized according to Halbach scheme / V. Ia. Gecha, A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings.– 2020. – V. 177. – No. 4 – P. 3–10.
4. Jang S. M., Lee Sung-Ho. Comparison of two types of PM linear synchronous servo and miniature motor with air-cored film coil / S. M. Jang, Sung-Ho Lee // IEEE Transactions on Magnetics. – 2002. – Vol. 38. – No. 5. – P. 3264–3266.
5. Electromagnetic Design of Toroidal Permanent Magnet Linear Synchronous Motor / Y. Mao, Z. Sun, W. Zhou [et al.] // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – P. 98005–98012. – DOI : 10.1109/ACCESS.2021.3095912.

*Nina Andreevna Belokurova*, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Head of Sector,  
tel.: +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.

*Andrei Borisovich Zakharenko*, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department,  
tel.: +7 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.  
(JC «VNIEM Corporation»).