

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ

УДК 621.313

КОЛЬЦЕВОЙ ДВИГАТЕЛЬ-МАХОВИК ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, СОБРАННЫМИ ПО СХЕМЕ ХАЛЬБАХА

А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова

Двигатели-маховики широко применяются в качестве исполнительных органов систем ориентации и стабилизации малых и средних космических аппаратов. В данной работе проведена оптимизация вариантов кольцевого двигателя-маховика прямоугольного поперечного сечения с постоянными магнитами, собранными по схеме Хальбаха, в сравнении с предложенной ранее конструкцией кольцевого двигателя-маховика круглого поперечного сечения. Критериями сравнения выбраны удельная по длине осевая электромагнитная сила и удельная по объему осевая электромагнитная сила. Расчеты проведены с применением метода конечных элементов. Рассматривались варианты кольцевого двигателя-маховика с различными ширинами постоянных магнитов и полюсными делениями. При этом сохранялся ток обмотки статора. В результате получены варианты, у которых удельная по объему и по длине сила у кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения лучше, чем у кольцевого двигателя-маховика круглого сечения того же объема, однако это улучшение находится в пределах расчетной погрешности.

Ключевые слова: кольцевой двигатель-маховик, постоянные магниты, 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 или длине электромашины. Недостатком применения схемы Хальбаха является сложность ее изготовления и, соответственно, высокая стоимость.

Конструкция кольцевого двигателя-маховика (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].

На рис. 1 показано перспективное торцевое исполнение линейной магнитоэлектрической машины, замкнутой в кольцо с числом полюсов $2p = 48$ и числом фаз $m = 3$ кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения. На рис. 2 представлен увеличенный фрагмент активной части кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения, где h_M – высота постоянного магнита; b_M – ширина постоянного магнита; l_δ – активная длина КДМ; τ – полюсное деление.

Постоянные магниты верхнего 1 и нижнего 2 индукторов ротора (см. рис. 1 и 2) прикреплены к ярам 3. Направление движения ротора отмечено стрелкой 4. Верхний индуктор ротора собран из постоянных магнитов с циклическим повторением следующей известной последовательности Хальбаха изменения углов вектора намагниченности постоянных магнитов: $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ, 180^\circ, 225^\circ, 270^\circ, 315^\circ$ – где

углы измеряются от направления движения ротора по часовой стрелке. Нижний индуктор ротора собран из постоянных магнитов с циклическим повторением следующей известной последовательности Хальбаха изменения углов вектора намагниченности постоянных магнитов: $0^\circ, 315^\circ, 270^\circ, 225^\circ, 180^\circ, 135^\circ, 90^\circ, 45^\circ$. Направление намагниченности сборок Хальбаха на верхнем и нижнем индукторах согласованы так, чтобы магнитный поток, созданный постоянными магнитами сборок Хальбаха верхнего и нижнего индукторов, складывался. Направления намагниченности повторяются циклически. Число циклов повторения направления намагниченности равно числу пар полюсов ротора. Магнитный поток каждого постоянного магнита 1 и 2 проходит через воздушный зазор 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 ярем 3 ротора не требуется. Ярма 3 нужны только для крепления постоянных магнитов.

Представляет интерес оптимизация КДМ прямоугольного сечения, а также сравнение результатов оптимизации с полученными в работе [3].

Целью данной статьи является выбор наилучшего варианта кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения, возбуждаемого от магнитной сборки Хальбаха (см. рис. 1 и 2), в сравнении с вариантом КДМ круглого сечения, полученным в диссертационной работе [3]. Критериями сравнения выбраны:

- максимальная удельная по объему осевая сила;
- максимальная удельная по длине осевая сила.

Расчетная модель. Двумерная расчетная модель (рис. 3) построена с использованием метода конечных элементов в программном комплексе Ansys Maxwell 16. При построении расчетной модели установлены следующие граничные условия:

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

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. 3 показаны направления намагниченности постоянных магнитов; 1 – статор; 2 – ротор; δ – величина воздушного зазора; h_{ob} – высота катушки обмотки; b_{ob} – ширина катушки обмотки. 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 сравнения электромагнитной силы КДМ, согласно рис. 3, и КДМ, описанного в [3], в обоих вариантах приняты одинаковыми:

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

Второе условие реализовано в модели (см. рис. 3) при одинаковой площади поперечного сечения каждой катушки обмотки статора $h_{ob} \times b_{ob} = 13,9$ мм², при этом плотность тока в катушке составляет $J = 5,6$ А/мм².

Сила рассчитывалась для случая, когда в катушках фаз A+, C+ A–, C– задана плотность тока $J = 5,6$ А/мм², при этом в катушках A–, C– ток протекает в обратном направлении относительно катушек A+, C+, в катушках фазы B+ и B– плотность тока $J = 0$ (см. рис. 3).

Высота и ширина постоянных магнитов варьировались в соответствии с табл. 1 с добавлением вариантов $b_M = 2,5$ мм; 3,5 мм.

Таблица 1
Варьируемые величины

Величина	Диапазон варьирования, мм	Шаг варьирования, мм
Высота постоянных магнитов	h_M	3 – 9
Ширина постоянных магнитов	b_M	2 – 6

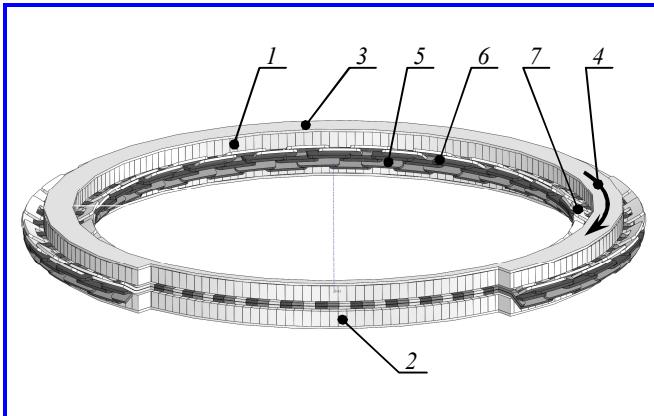


Рис. 1. Активная часть кольцевого двигателя-маховика в торцевом исполнении

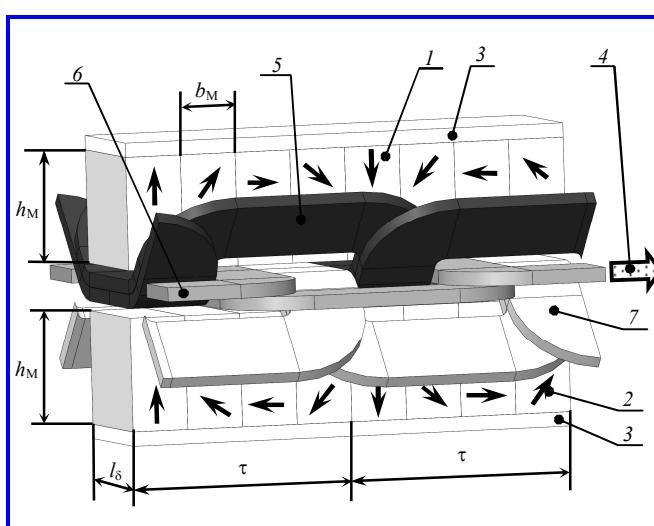


Рис. 2. Увеличенный фрагмент активной части кольцевого двигателя-маховика

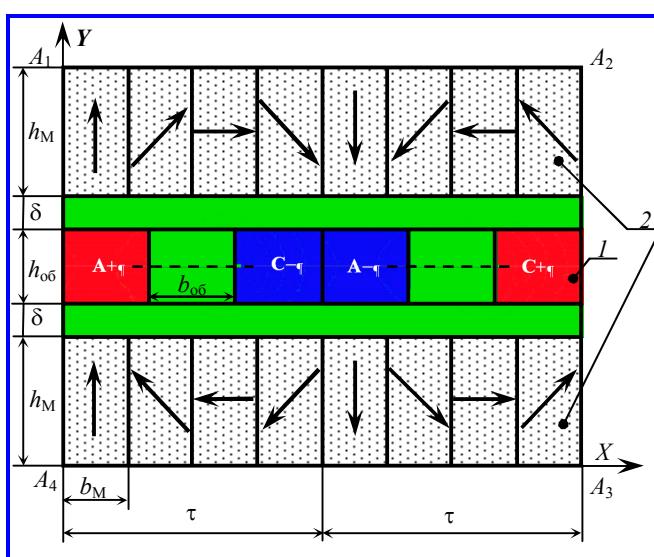


Рис. 3. Расчетная модель кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения с заданной плотностью тока в обмотке

В результате расчетов для каждого ряда h_M для фиксированного значения b_M должно быть найдено максимальное значение электромагнитной силы:

- отнесённой к объему F_x/V ;
- отнесённой к длине $F_x/(2\tau)$.

Следует отметить, что объем лобовых частей обмотки был рассчитан в предположении, что каждая из них представляет собой полукольцо (рис. 4) квадратного сечения, равного сечению катушки. При этом объем КДМ рассчитывался по формуле:

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

Длина l_δ принята равной 25 мм в расчётных вариантах, согласно рис. 5 – 8 и табл. 2, для того, чтобы объемы рассчитанных вариантов и прототипа [3] были примерно равны. Анализ влияния l_δ на значение осевой силы приведён на рис. 9.

Результаты расчетов. В результате проведённых расчетов получены распределения магнитной индукции. В качестве примера картина поля магнитной индукции B , полученная в результате расчета для двух произвольных вариантов, показана на рис. 5, 6.

Результаты расчета электромагнитной силы на единицу объема F_x/V приведены на рис. 7, электромагнитной силы на единицу длины $F_x/(2\tau)$ приведены на рис. 8. Точками на графиках отмечены расчетные значения.

Сравнение результатов расчета осевой электромагнитной силы, отнесённой к объему и длине для рассчитанных вариантов КДМ и КДМ согласно [3], приведены в табл. 2. Из анализа табл. 2 видно, что удельная по объему ($b_M = 2,5$ мм, $\tau = 10$ мм, вариант 1) и по длине ($b_M = 3$ мм, $\tau = 12$ мм, вариант 2) сила у КДМ прямоугольного сечения с $l_\delta = 25$ мм лучше, чем у КДМ круглого сечения, описанного в [3]. Наилучший рассчитанный результат по варианту 1 защищён патентом [4], а по варианту 2 – патентом [5]. Следует отметить, что полученное небольшое улучшение показателей находится в пределах погрешности расчета.

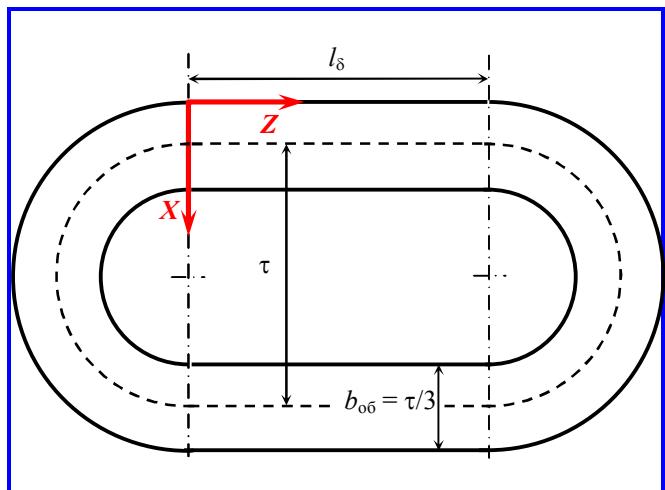


Рис. 4. Упрощенная схема катушки обмотки статора в плоскости XZ

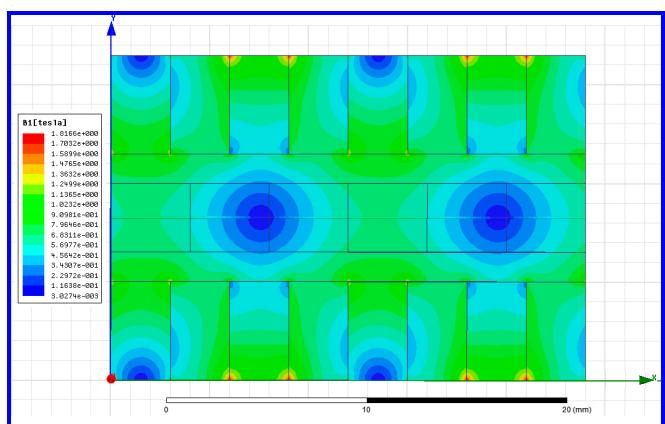


Рис. 5. Картина поля магнитной индукции B для варианта с $h_M = 5$ мм, $b_M = 3$ мм, $\tau = 12$ мм

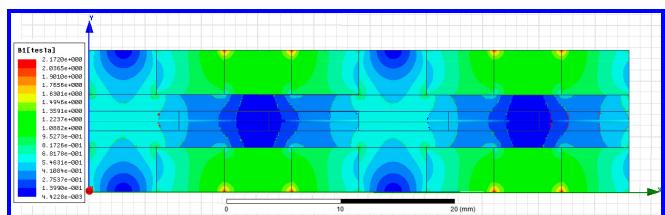


Рис. 6. Картина поля магнитной индукции B для варианта с $h_M = 4$ мм, $b_M = 6$ мм, $\tau = 24$ мм

Таблица 2

Сравнение результатов расчета электромагнитной силы для вариантов кольцевого двигателя-маховика прямоугольного сечения с кольцевым двигателем-маховиком круглого сечения согласно [3]

Вариант	Кольцевой двигатель-маховик прямоугольного сечения							Кольцевой двигатель-маховик круглого сечения согласно [3]	
	b_M , мм	2	2,5	3	3,5	4	5	6	
	τ , мм	8	10	12	14	16	20	24	
	h_{ob} , мм	5,2	4,17	3,48	2,98	2,6	2,09	1,74	
	b_{ob} , мм	2,66	3,33	4,0	4,7	5,3	6,7		
1	F_x/V , кН/м ³ , максимум	292,6	373,9	330,0	314,3	289,4	239,4	195,4	368
2	$F_x/(2\tau)$, Н/м, максимум	191,7	220,4	224,7	216,5	201,6	168,2	136,7	224,4

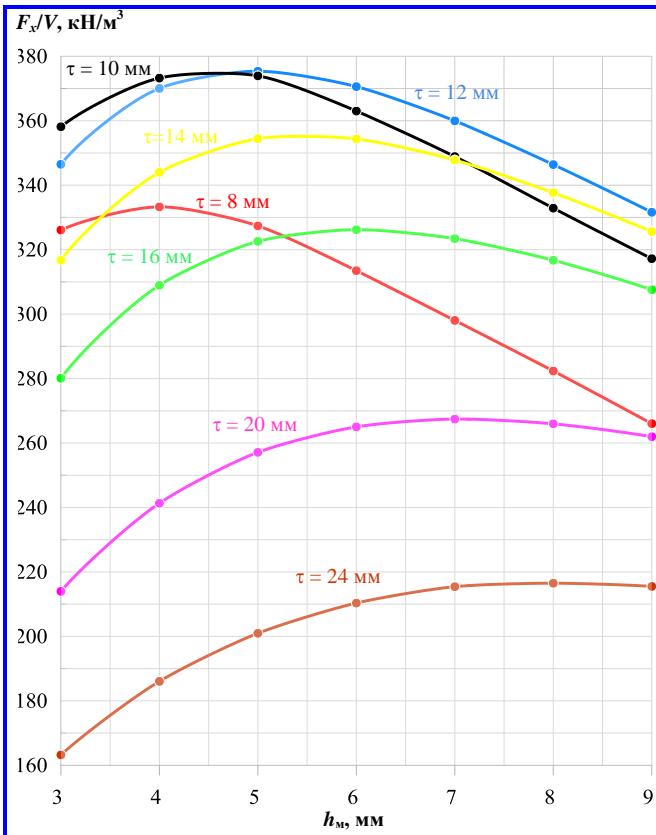


Рис. 7. Зависимость осевой силы, отнесённой к объему F_x/V , от высоты постоянных магнитов h_m

КДМ прямоугольного сечения значительно проще с точки зрения установки статора в КДМ и обладает лучшей ремонтопригодностью. 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. Однако, использование схемы Хальбаха требует разработки специальной оснастки для сборки, поэтому затраты на его производство не станут меньше, чем у КДМ круглого сечения.

Выводы

1. Применение схемы Хальбаха, как правило, позволяет повысить значение магнитной индукции в воздушном зазоре, а увеличение магнитной индукции в свою очередь дает возможность получить большее значение электромагнитной силы.

2. У КДМ прямоугольного сечения с $l_8 = 25$ мм удельная по объему сила (при $b_M = 2,5$ мм, вариант 1) и удельная по длине сила (при $b_M = 3$ мм, вариант 2) лучше, чем у КДМ круглого сечения, описанного в [3]. Однако, это улучшение в пределах погрешности расчета.

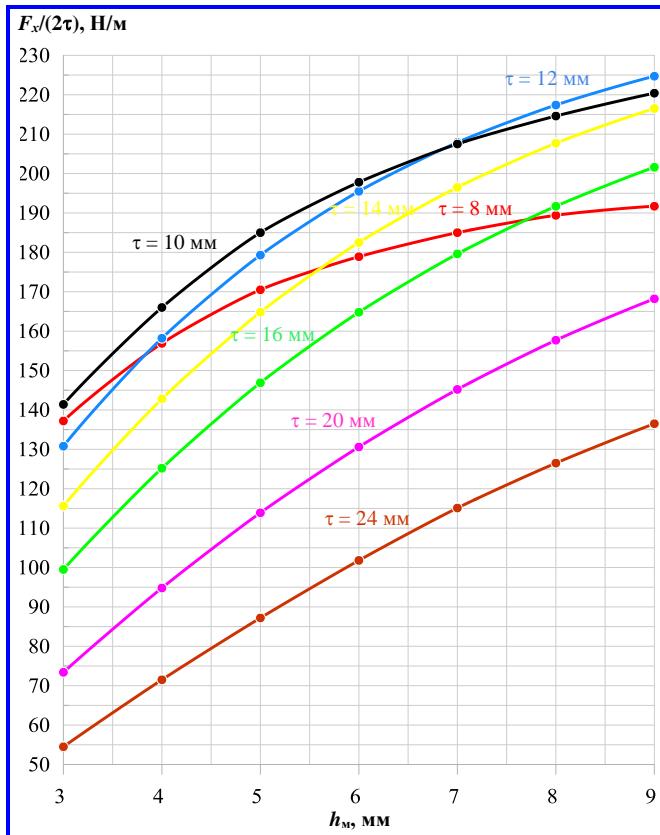


Рис. 8. Зависимость осевой силы, отнесённой к длине $F_x/(2\tau)$, от высоты постоянных магнитов h_m

3. КДМ прямоугольного сечения значительно проще с точки зрения установки статора в КДМ и обладает лучшей ремонтопригодностью. 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. Однако, использование схемы Хальбаха требует разработки специальной оснастки для сборки, поэтому затраты на его производство не станут меньше, чем у КДМ круглого сечения.

Литература

- Патент на изобретение № 2650178 Российской Федерации, 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 / Геча В. Я., Захаренко А. Б., Пугач И. Ю., Белокурова Н. А., Красова Н. А. – Бюл. № 11. – 13 с.
- 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. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2022. – 135 с.
4. Патент на изобретение № 2829315 Российской Федерации, МПК H02K 41/03 (2006.01), H02K 33/16 (2006.01), H02K 1/2792 (2022.01). Линейная магнитоэлектрическая машина : № 2024113567 ; заявл. 20.05.2024 ; опубл. 30.10.2024 / А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова. – Бюл. № 31. – 13 с.
5. Патент на изобретение № 2829312 Российской Федерации, МПК H02K 41/03 (2006.01), H02K 33/16 (2006.01), H02K 1/2792 (2022.01). Магнитоэлектрическая машина : № 2024114303 ; заявл. 27.05.2024 ; опубл. 30.10.2024 / А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова, Д. Ю. Носов. – Бюл. № 31. – 13 с.

Поступила в редакцию 14.11.2024

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, доцент, начальник отдела, т. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniitem.ru.
Нина Андреевна Белокурова, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, т. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniitem.ru.
(AO «Корпорация «ВНИИЭМ»).

RECTANGULAR CROSS SECTION RING-SHAPED REACTION WHEEL WITH THE PERMANENT MAGNETS ASSEMBLED IN COMPLIANCE WITH HALBACH SCHEME

A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova

Reaction wheels are widely used as actuating elements of the attitude control systems for small and medium space crafts. Optimization of variants of rectangular cross section ring-shaped reaction wheel with the permanent magnets assembled in compliance with Halbach scheme in comparison with the design of circular cross section ring-shaped reaction wheel, presented earlier, has been performed. The specific axial electromagnetic force in terms of length and the specific axial electromagnetic force in terms of volume were chosen as the comparison criteria. The calculations were performed using the finite element method. Variants of ring-shaped reaction wheel with different widths of permanent magnets and polar pitches were considered. At the same time the current of the stator winding was maintained. As a result, the variants, which have better specific force of rectangular cross section ring-shaped reaction wheel in terms of volume and length in comparison with the circular cross-section ring-shaped reaction wheel of the same volume, were obtained, however, the present improvement is within the estimated error limits.

Key words: ring-shaped reaction wheel, permanent magnets, 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 : publ. 11.04.2018 / V. Ia. Gecha, A. B. Zakharenko, I. Iu. 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. VNIIEМ 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. – Moscow : VNIIEМ Corporation JC, 2022 – 135 p.
4. Patent for invention No. 2829315 Russian Federation, IPC H02K 41/03(2006.01), H02K 33/16(2006.01), H02K 1/2792(2022.01). Linear magnetoelectric machine : No. 2024113567 : appl. 20.05.2024 : publ. 30.10.2024 / A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova. – Bull. No. 31 – 13 p.
5. Patent for invention No. 2829312 Russian Federation, IPC H02K 41/03(2006.01), H02K 33/16(2006.01), H02K 1/2792(2022.01). Magnetoelectric machine : No. 2024114303 : appl. 27.05.2024 : publ. 30.10.2024 / A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova, D. Yu. Nosov. – Bull. No. 31 – 13 p.

Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, т. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniitem.ru.

Nina Andreevna Belokurova, Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of Department, т. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniitem.ru.
(JC «VNIIEМ Corporation»).