

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ КОНСТРУКЦИЙ РОТОРА КОЛЬЦЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ-МАХОВИКА НА ОПОРАХ С ПОДШИПНИКАМИ КАЧЕНИЯ

А. Б. Захаренко, Н. А. Белокурова, А. К. Надкин

Двигатели-маховики широко применяются в качестве исполнительных органов систем ориентации и стабилизации средних и малых космических аппаратов. Синхронные двигатели с постоянными магнитами и дробной зубцовой обмоткой обладают большим потенциалом для использования в качестве специальных электрических машин и применения в космической отрасли. В данной работе исследованы возможные варианты выполнения роторов кольцевых двигателей-маховиков, проведен сравнительный анализ влияния их конфигураций и магнитных свойств на величину электромагнитной силы. Электромагнитные расчеты проведены с применением метода конечных элементов. Полученные результаты позволяют определить тип ротора, который обеспечивает наибольшую электромагнитную силу.

Ключевые слова: кольцевой двигатель-маховик, постоянные магниты, электромагнитная сила.

Конструкция кольцевого двигателя-маховика (КДМ) с улучшенными массогабаритными характеристиками была получена за счет совмещения подшипникового узла с ротором и защищена патентом [1]. При этом ротор фактически представляет собой подшипник скольжения. Конструкция имеет, в том числе, хорошие удельные показатели за счет оптимального выбора ширины полюсного деления, ширины ферромагнитной вставки и ширины постоянного магнита ротора при оптимальном числе пазов на полюс и фазу [2].

Для обеспечения достаточного управляющего момента и частоты вращения до 5000 об/мин представляет интерес рассмотрение конструкции КДМ с ротором, устанавливаемым в роликовые опоры с подшипниками качения, при этом конструкция ротора должна предусматривать наличие гладкой поверхности сопряжения с роликами и возможность балансировки. Для этого ротор КДМ предлагается создать на основе прочного тора с выфрезерованными местами крепления магнитов (рис. 1).

Целью данной работы является анализ возможных вариантов создания ротора кольцевого двигателя-маховика, установленного в роликовые опоры с подшипниками качения для снижения потерь на трение. На рис. 2 показаны варианты размещения постоянных магнитов в роторе. Задачей настоящей статьи является исследование влияния конфигурации ротора и его магнитных свойств на характеристики КДМ.

Модель КДМ схематично показана на рис. 1.

Ротор КДМ, состоящий из сепаратора ротора 1 и размещенных в нем постоянных магнитов 2 и 3 чередующейся полярности намагниченных в осевом направлении, устанавливается в роликовые опоры 5 с подшипниками качения 6. При этом роликовые опоры могут располагаться как внутри ротора,

как это показано на рис. 1, так и снаружи. Катушки якорной обмотки 4 располагаются вокруг ротора, при этом они могут быть расположены как равномерно вдоль всей окружности КДМ, так и внутри некоторого сектора, по принципу дугостаторной электрической машины. Выгодной отличительной особенностью КДМ является отсутствие лобовых частей якорной обмотки. КДМ снаружи может быть защищен кожухом 8. Возможно также размещение не в кожухе, а в твердотельном статоре, имеющем полость под ротор, ролики и катушки. Материалом статора может выступать феррит, сочетающий в себе хорошие ферромагнитные свойства и высокое удельное электрическое сопротивление.

Конструкция сепаратора ротора в КДМ имеет существенное значение, потому как сепаратор является одновременно частью магнитной системы и механического узла вращения. Конструкция сепаратора

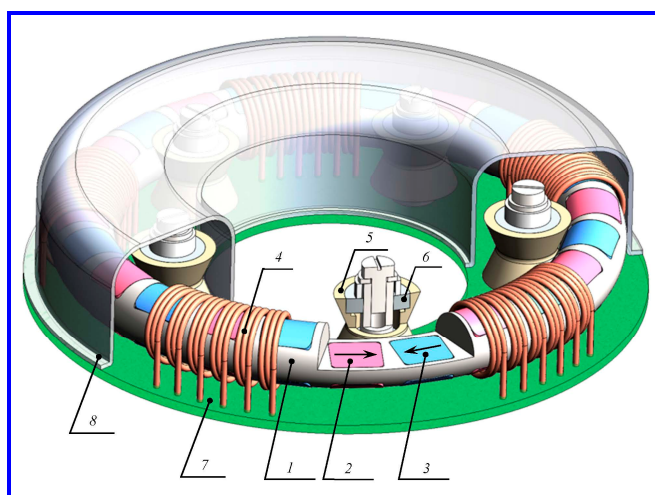


Рис. 1. КДМ с внутренним расположением магнитов в роторе: 1 – сепаратор ротора; 2 – «южный» магнит; 3 – «северный» магнит; 4 – катушки обмотки; 5 – ролик; 6 – подшипник; 7 – основание; 8 – кожух

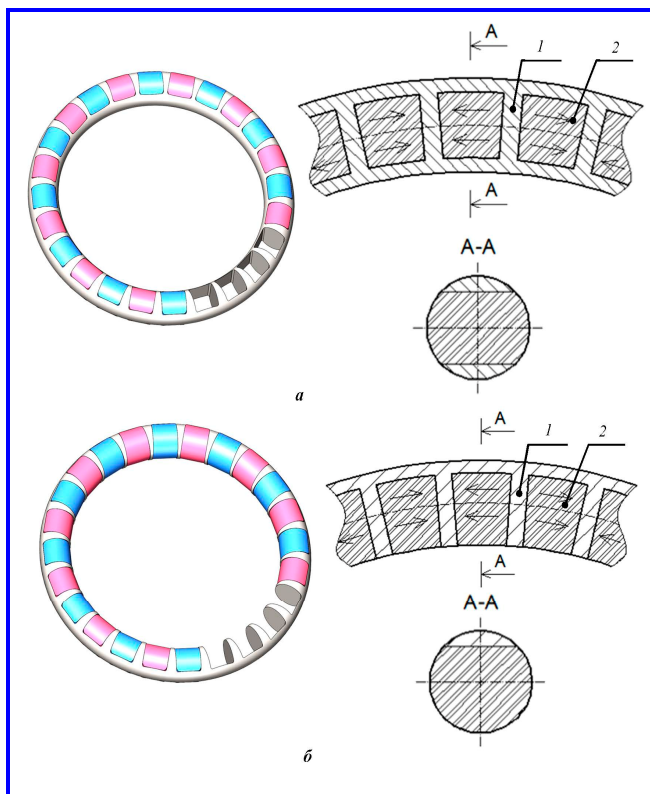


Рис. 2. Ротор КДМ и его поперечное сечение:
a – с симметричным расположением магнитов;
б – с несимметричным расположением магнитов:
1 – сепаратор ротора; ***2*** – постоянные магниты

также должна обеспечивать возможность балансировки ротора. Варианты выполнения отверстий под магниты в роторе показаны на рис. 2.

Магнитные свойства ротора могут существенно влиять на характеристики КДМ. Выполнение ротора из ферромагнитного материала вызовет шунтирование части полезного магнитного потока через его

спинку-ядро, что снизит величину электромагнитной силы (ЭМС).

С другой стороны, наличие ферромагнитных проставок между магнитами позволит получить прибавку величины ЭМС за счет реактивной составляющей силы. Количественно оценить влияние конфигурации ротора и его магнитных свойств можно путем моделирования электромагнитных процессов методом конечных элементов.

Анализ оптимальности конструкции и магнитных свойств ротора был проведен по критерию максимума ЭМС. Расчет ЭМС проведен методом конечных элементов в программной среде Ansys Maxwell. Поскольку магнитные системы на рис. 1 и 2 не обладают необходимыми условиями симметрии для представления в осесимметричной или плоскопараллельной постановке, моделирование проводилось в трехмерной постановке задачи. Тор был заменен прямолинейным участком, решена задача магнитостатики, учитывающая взаимодействие поля возбуждения с полем обмотки якоря и нелинейный характер магнитной проницаемости ротора, в случае выполнения его ферромагнитным. На рис. 3 *a, б* показаны активные части рассмотренных расчетных моделей (рис. 2 *a, б*), для лучшего восприятия катушки показаны прозрачными. Для сравнительного анализа к моделям по рис. 2 была добавлена модель с наборным ротором из ферромагнитных шаров и цилиндрических магнитов (рис. 3, *в*), описанная в патенте [1]. Число катушек на полюс и фазу во всех моделях $q = 1$.

Плотность тока в катушках во всех расчетах $J = 20 \text{ А/мм}^2$. При расчетах учтены мгновенные значения токов, отмеченные на рис. 4, и соответствующее положение ротора.

На рис. 5 показаны некоторые характерные размеры моделей (в мм).

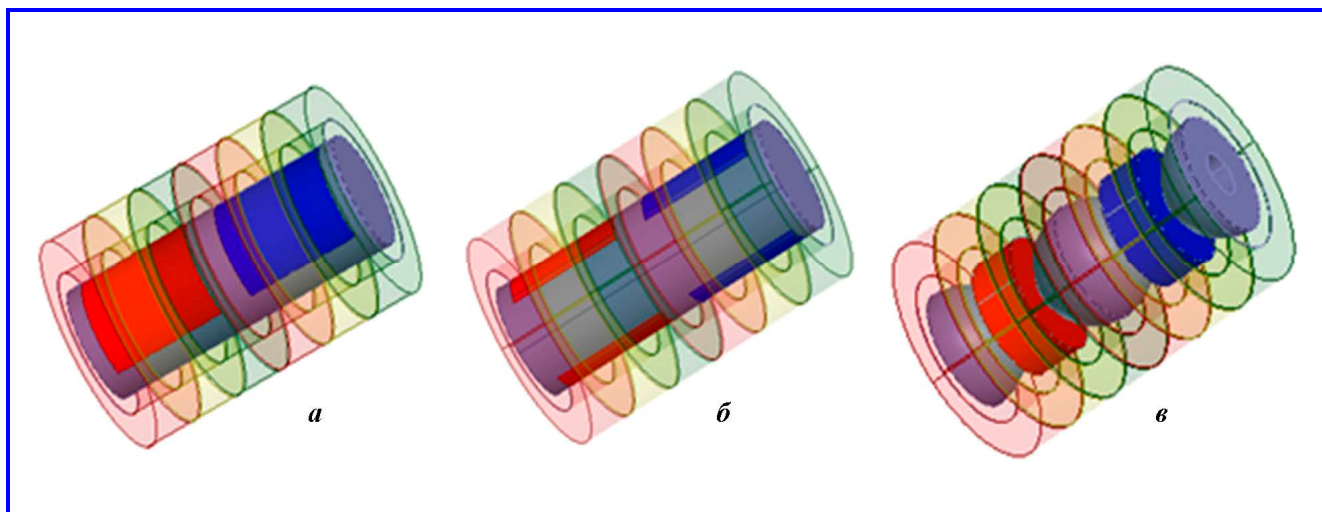


Рис. 3. Активные части рассмотренных расчетных моделей

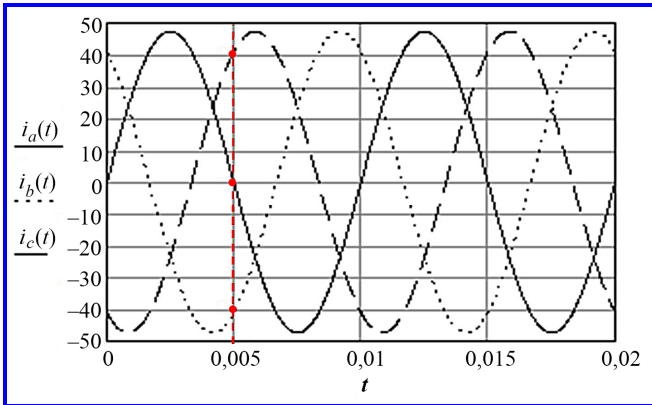


Рис. 4. Токи в фазах якорной обмотки

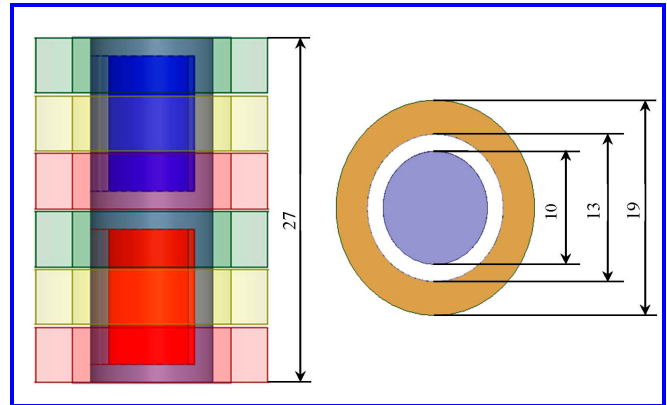


Рис. 5. Характерные размеры расчетных моделей

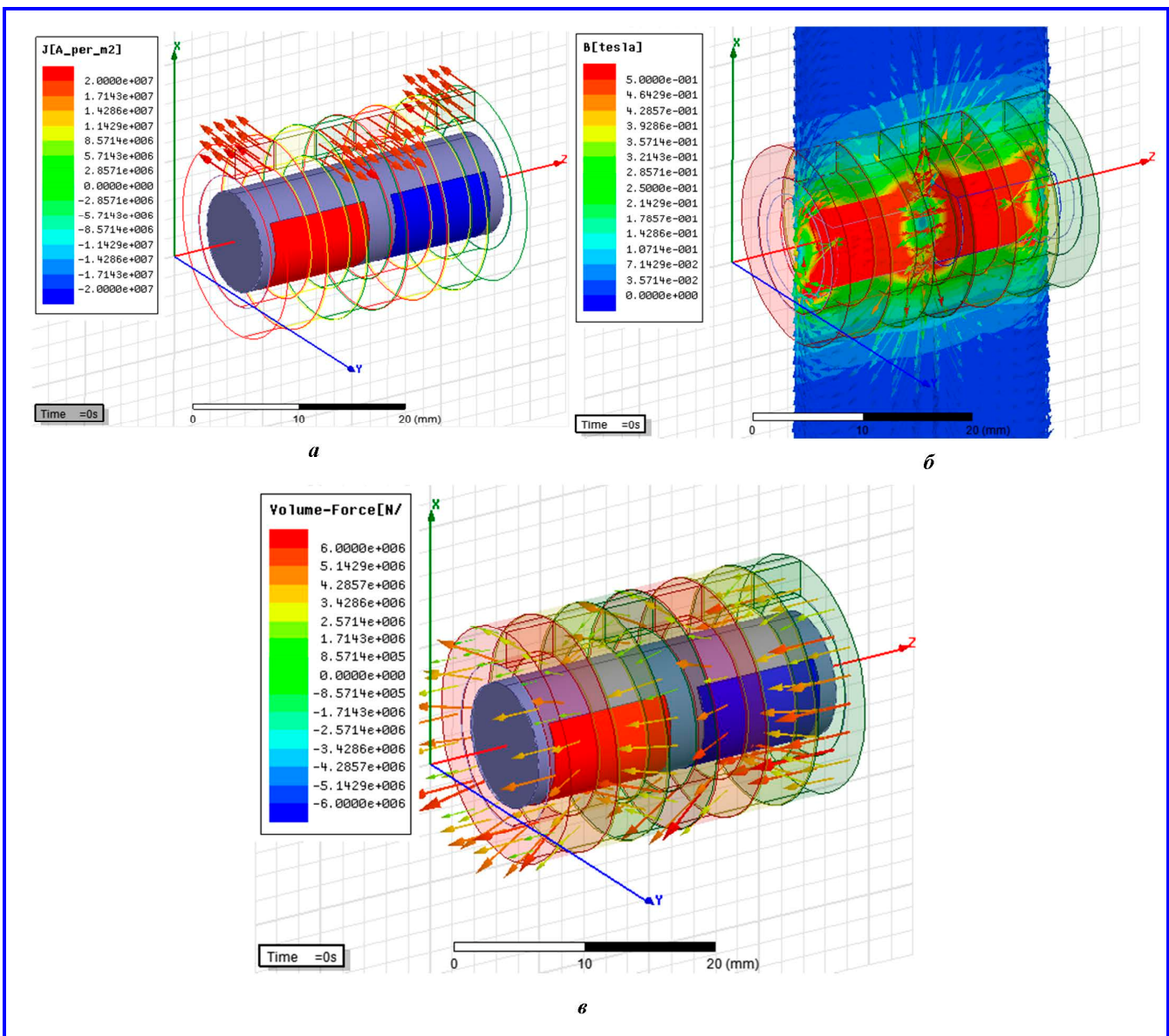


Рис. 6. Результаты расчета 3D-модели: *a* – вектора плотности тока через сечения катушек (A/m^2); *b* – распределение магнитного поля (Тл); *в* – вектора объемной плотности силы, действующей на катушки с током (N/m^3)

Таблица

Расчетные значения ЭМС

Тип ротора	Магнитные свойства ротора	Осевая сила, Н	Объем магнита, мм ³	Удельная сила по объему магнита, Н/мм ³	Удельная сила по длине элементарной машины, Н/мм
Отверстия сбоку (рис. 2, б)	$\mu = 1$	7,3	710	$10,3 \cdot 10^{-3}$	0,270
	ферромагнитный	6,3		$8,9 \cdot 10^{-3}$	0,233
Отверстия сквозные (рис. 2, а)	$\mu = 1$	6,8	672	$10,1 \cdot 10^{-3}$	0,252
	ферромагнитный	5,3		$7,9 \cdot 10^{-3}$	0,196
Наборный ротор (рис. 3, в)	$\mu = 1$	3,6	286	$12,6 \cdot 10^{-3}$	0,133
	ферромагнитный	4,6		$16,1 \cdot 10^{-3}$	0,17

Поскольку ЭМС подобных магнитных систем отличается малыми пульсациями при перемещении ротора [2], магнитостатический расчет в одном заданном положении ротора вполне корректно в рамках данной задачи отражает ее величину. Величины токов в фазах обмотки якоря и положение полюсов ротора относительно обмотки выбраны так, что моделируется положение вектора тока по поперечной магнитной оси магнитной системы.

На рис. 6 показан пример расчета модели по рис. 2, б, ротор неферромагнитный. Аналогичные расчеты проведены и для других моделей.

Рис. 6, а и б отражают положение вектора тока якоря относительно потока индуктора, рис. 6, в показывает, что проекции всех векторов ЭМС на ось Z сонаправлены. Для удобства сравнения расчетных моделей определены проекции суммарных ЭМС, действующих на ротор по оси Z. Полученные результаты определения ЭМС представлены в таблице.

По результатам таблицы следует, что наибольшее значение силы достигнуто в модели с неферромагнитным ротором, отверстия под магниты в котором выполнены в соответствии с рис. 2, б, значение ЭМС составляет 7,3 Н. В моделях с несимметричным расположением магнитов в роторе и с наборным ротором величина ЭМС меньше, так как при заданном диаметре ротора и полюсном делении объем магнитов в них меньше. Уменьшение ЭМС при выполнении ротора ферромагнитным связано с шунтированием части магнитного потока через ферромагнитные участки на пути прохождения магнитного потока. Наилучшее значение удельной силы по объему

магнитов получено в модели с наборным ротором. Наилучшее значение удельной силы по длине элементарной машины получено для магнитной системы с неферромагнитным ротором и отверстиями по рис. 2, б.

Выводы

1. Предложена конструкция кольцевого двигателя-маховика с подшипниками качения ротора, обладающая малыми потерями на трение.
2. Рассмотрены различные варианты расположения магнитов в роторе. Проанализировано влияние конфигурации ротора и его магнитных свойств на величину электромагнитной силы. Проведены расчеты.
3. Из анализа результатов проведенных расчетов следует, что наибольшее значение электромагнитной силы достигается в модели с неферромагнитным ротором и расположением магнитов по рис. 2, б.

Литература

1. Патент на изобретение РФ № 2650178 по заявке № 2017131262. Двигатель-маховик. Авторы: Геча В. Я., Захаренко А. Б., Пугач И. Ю., Белокурова Н. А., Красова Н.А. – Опубликовано 11.04.2018. – Бюллетень № 11. – 13 с.
2. 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. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2021. – Т. 180. – № 1. – С. 3 – 9.

Поступила в редакцию 15.08.2022

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, доцент, начальник отдела, т. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.

Нина Андреевна Белокурова, кандидат технических наук, начальник сектора, т. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.

Александр Каренович Надкин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, т. 8 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

ANALYSIS OF ALTERNATIVE DESIGNS OF ROTOR FOR RING-SHAPED REACTION WHEEL WITH ROLLING BEARING SUPPORTS

A. B. Zakharenko, N. A. Belokurova, A. K. Nadkin

Reaction wheels are widely used as actuating elements of the attitude and orientation control systems for medium and small spacecraft. Synchronous motors with permanent magnets and fractional tooth winding have a great potential for application as special electrical machines and use in space industry. This article investigates possible options for the design of rotors for ring-shaped reaction wheels, and presents comparative analysis of the effect of their configuration and magnetic properties on the magnitude of electromagnetic force. The electromagnetic calculations were performed using the finite element method. The received results allow to define the type of rotor ensuring the maximum electromagnetic force.

Key words: ring-shaped reaction wheel, permanent magnets, electromagnetic force.

References

1. Patent for invention of the Russian Federation No. 2650178 under application No. 2017131262. Reaction wheel. Authors: V. Ia. Gecha, A. B. Zakharenko, I. Iu. Pugach, N. A. Belokurova, N. A. Krasova Published on 11.04.2018. – Bulletin No. 11. – 13 p.
2. 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. – Moscow: VNIEM Corporation JSC. – V. 180. – No. 1. – 2014. – Pp. 3 – 9.

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

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

Aleksandr Karenovich Nadkin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher, tel.: +7 (495) 366-54-24, e-mail: lab183@mcc.vniem.ru. (JC «VNIEM Corporation»).