

УДК 621.313

СПОСОБЫ НАМАГНИЧИВАНИЯ И СБОРКИ КОЛЕЦ ХАЛЬБАХА РОТОРОВ СИНХРОННЫХ МАШИН

А. Б. Захаренко, А. К. Надкин, К. С. Осикова

Проанализирован известный способ намагничивания ротора, использующего полную схему Хальбаха расположения векторов намагниченности постоянных магнитов, предложенный в патенте фирмы General Electric Company (США), на предмет возможности обеспечения синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. Предложена новая конструкция электромашин с ротором, созданным по упрощенной схеме Хальбаха, позволяющая увеличить максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре по сравнению с известными электромашинами. Предложен новый и достаточно технологичный способ намагничивания и сборки ротора, использующего упрощенную схему Хальбаха, позволяющий получить двигатель-маховик с большим моментом инерции ротора и высокими удельными показателями за счет увеличения индукции в зоне обмотки такой машины более чем в 1,5 раза по сравнению с традиционными конструкциями.
Ключевые слова: постоянный магнит, кольцо Хальбаха, способ намагничивания.

Двигатели-маховики входят в состав системы ориентации и стабилизации космических аппаратов (КА). К ним предъявляются следующие основные требования: необходимо наличие значительного момента инерции ротора, причем двигатель-маховик не должен являться источником вибраций космического аппарата, по крайней мере, в режиме стереосъемки подстилающей поверхности. При этом, как и любое изделие для применения в космосе, двигатель-маховик должен обладать высокими удельными характеристиками: мощностью и моментом. Известно, что наилучшими удельными характеристиками отличаются синхронные электрические машины с возбуждением от постоянных магнитов (СМПМ). Наиболее перспективным считается исполнение ротора СМПМ с расположением векторов намагниченности постоянных магнитов по схеме Хальбаха.

Пример поперечного сечения СМПМ с расположением векторов намагниченности в соответствии с полной схемой Хальбаха по патенту [1] General Electric Company (США) показан на рис. 1.

Целью настоящей работы является выбор оптимального способа намагничивания и сборки ротора СМПМ, намагниченного по схеме Хальбаха.

Задачами этой статьи являются:

- анализ известного способа намагничивания постоянных магнитов, расположенных по полной схеме Хальбаха;
- расчет распределения магнитной индукции в воздушном зазоре электромашин с ротором, намагниченным по п. 1 с диаметром ротора 340 мм, выявление недостатков;
- создание новой конструкции ротора двигателя-маховика, а также способа намагничивания постоянных магнитов ротора с упрощенной схемой

Хальбаха расположения векторов намагниченности постоянных магнитов.

Анализ известного способа намагничивания постоянных магнитов [1] показывает, что полная схема Хальбаха предназначена для создания синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре. Это, как верно отмечено в патенте [1], приводит к снижению потерь от высших гармоник в электромашине, к уменьшению пульсаций вращающего момента, вибраций и акустического шума. Для двигателя-маховика в патенте [2] предложена упрощенная схема Хальбаха расположения векторов намагниченности постоянных магнитов. Проведем их сравнительный анализ.

Для выявления наилучшего варианта способа намагничивания и сборки ротора электромашин были проведены расчеты распределения магнитного поля в воздушном зазоре. Модельная задача решалась для трех вариантов ротора:

- в соответствии с патентом [1], полная сборка Хальбаха, рис. 1;

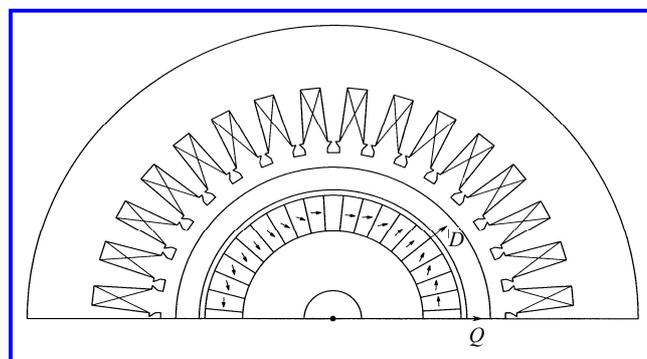


Рис. 1. Поперечное сечение и направление векторов намагниченности постоянных магнитов ротора, собранного по полной схеме Хальбаха

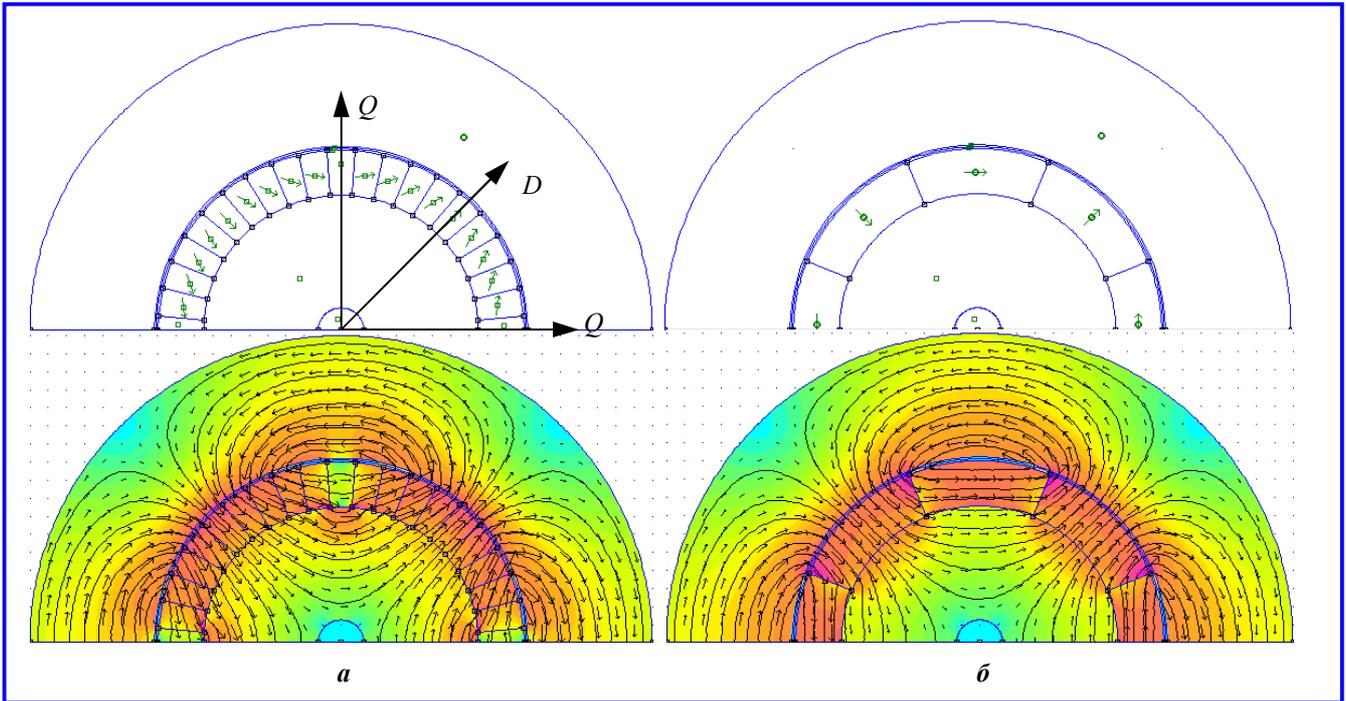


Рис. 2. Направление векторов намагниченности в массиве постоянных магнитов ротора, собранного по полной схеме Хальбаха, согласно [1] (а), а также по упрощенной схеме Хальбаха (б)

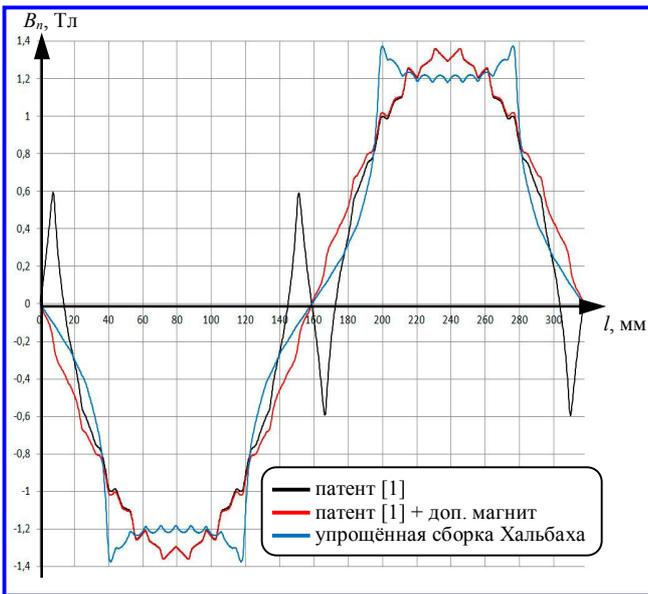


Рис. 3. График распределения нормальной составляющей индукции B_n в середине немагнитного зазора

– в соответствии с патентом [1], полная сборка Хальбаха, с исправлением недостатка (с дополнительным магнитом между полюсами);

– упрощенная сборка Хальбаха, при этом, для удобства сравнения суммарная высота постоянных магнитов и суммарный воздушный зазор выбраны такими же, как для первых двух расчетных моделей.

Расчетные модели приведены на рис. 2, а результаты моделирования – на рис. 3. При анализе магнитного поля для ротора, намагниченного описанным в [1] способом (рис. 2, а), получаем черную кривую на рис. 3, достаточно далекую от синусоиды. При добавлении постоянного магнита на пустое место (рис. 1) на роторе с направлением вектора намагниченности слева направо, параллельно оси Q (см. рис. 1) получаем красную кривую (рис. 3), более близкую к синусоиде. Из этого следует, что способ, описанный в патенте [1] General Electric Company (США), обладает существенным недостатком: не удастся намагнитить магнит, находящийся непосредственно под пазом намагничивающей оснастки, в результате цель патента – получение синусоидального распределения магнитной индукции – не достигается.

Расчет магнитного поля в поперечном сечении двигателя с упрощенной схемой Хальбаха приведен на рис. 2, б. График распределения нормальной составляющей индукции в зоне обмотки якоря приведен на рис. 3 в виде голубой кривой линии.

Эта кривая достаточно далека от синусоиды, однако предложенная в [2] конструкция ротора с упрощенной схемой Хальбаха, а также способ ее намагничивания и сборки [3] достаточно просты и позволяют получить высокое значение магнит-

ной индукции в зоне обмотки статора электромашины, а значит и высокие значения удельных мощностей и момента. Приведенная на рис. 4 конструкция поперечного сечения двигателя-маховика позволяет получить такой же характер зависимости индукции ротора от координаты по окружности ротора, как и голубая кривая на рис. 3, однако при оптимальном проектировании максимальное значение индукции достигает 1,5 Тл и более [4]. Эта конструкция, отличающаяся также большим моментом инерции ротора, малыми магнитными потерями, отсутствием пульсаций момента, вызванных зубчатостью и силами магнитного тяжения.

Способ намагничивания ротора двигателя-маховика предложен и подробно описан в патенте на изобретение [3]. Устройство намагничивания приведено на рис. 5. Подача постоянного напряжения с целью намагничивания постоянных магнитов возможна на три катушки (две катушки 5 и одну 6), при этом $U = U_1 + U_2$ для намагничивания сразу трех постоянных магнитов, как показано на рис. 6.

Для обеспечения намагничивания оставшихся ненамагниченными магнитов постоянное напряжение должно быть подано только на катушку 6 для намагничивания по одному магниту еще ненамагниченных постоянных магнитов с радиальным направлением намагничивания (путем перемещения катушки 6 от магнита к магниту после намагничивания). Либо постоянное напряжение должно быть подано только на катушки 5 для намагничивания постоянных магнитов с тангенциальным направлением намагничивания. При этом полярность напряжений U_1 и U_2 должна быть такой, чтобы направление создаваемого катушками магнитного потока было согласовано с необходимым направлением намагничивания постоянных магнитов.

Направление создаваемого катушками магнитного потока на рис. 5, также как и направление намагничивания постоянных магнитов на рис. 4, показано стрелками. Намагничивание постоянных магнитов внешнего кольца Хальбаха двигателя-маховика производится аналогично.

Таким образом, предложен новый и достаточно технологичный способ [3] намагничивания и сборки ротора, использующего упрощенную схему Хальбаха, позволяющий получить двигатель-маховик с большим моментом инерции ротора и высокими удельными показателями за счет увеличения индукции в зоне обмотки такой машины до 1,5 Тл и более [4].

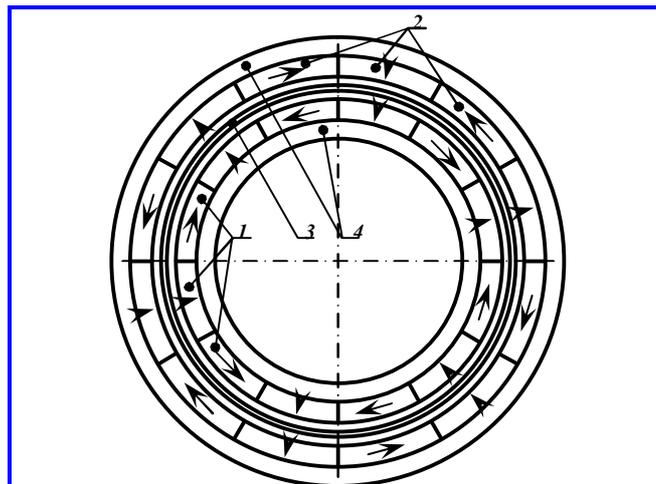


Рис. 4. Поперечное сечение и направление векторов намагниченности постоянных магнитов ротора, собранного по упрощенной схеме Хальбаха:
1, 2 – постоянные магниты ротора;
3 – обмотка статора; 4 – ярма ротора

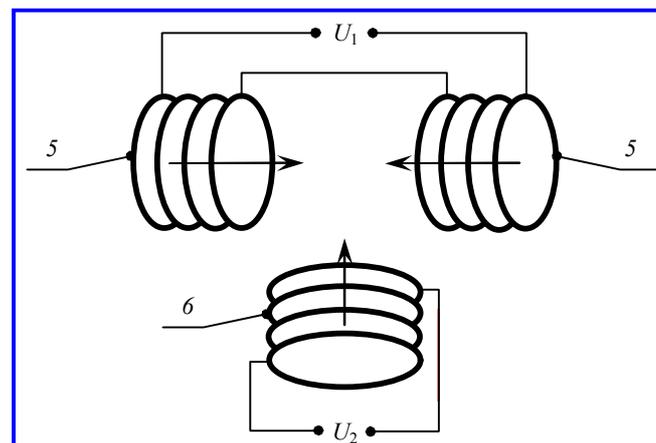


Рис. 5. Устройство намагничивания постоянных магнитов ротора

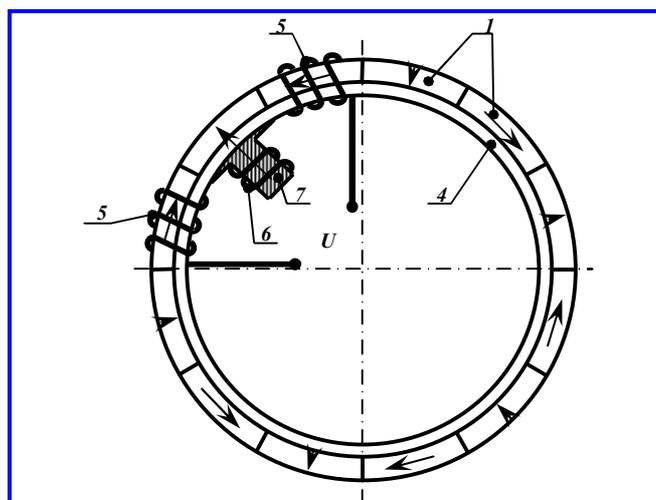


Рис. 6. Намагничивание постоянных магнитов внутреннего кольца Хальбаха двигателя-маховика

Выводы

1. Способ намагничивания ротора, использующего полную схему Хальбаха расположения векторов намагниченности постоянных магнитов, предложенный в патенте фирмы General Electric Company (США), не позволяет достичь цели патента – синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре.

2. Предложена новая конструкция электромашины с ротором, созданным по неполной схеме Хальбаха, позволяющая увеличить максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре по сравнению с традиционными машинами.

3. Предложен новый и достаточно простой способ намагничивания и сборки ротора, использующего неполную схему Хальбаха, позволяющий получить двигатель-маховик с большим моментом инерции ротора и высокими удельными показателями за счет увеличения индукции в зоне обмотки такой машины до 1,5 Тл и более.

Литература

1. Патент на изобретение № 2412516 Российская Федерация. Система и способ для намагничивания роторов типа постоянных магнитов в электрических машинах : № 2006110348 : заявл. 30.03.2006 : опубл. 20.10.2007 / Стефенз Ч. М.; патентообладатель Дженерал Электрик Компани (США). – Бюл. № 29. – 15 с.
2. Патент на полезную модель № 196343 Российская Федерация. Электромашина с ротором, созданным по схеме Хальбаха : № 2019143130 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 26.02.2020 / Захаренко А. Б., Надкин А. К., Осикова К. С., Решетников М. Е. – Бюл. № 6. – 9 с.
3. Патент на изобретение № 2718537 Российская Федерация. Способ намагничивания и сборки кольца Хальбаха ротора электромашины (варианты) : № 2019139427 : заявл. 04.12.2019 : опубл. 08.04.2020 / Захаренко А. Б., Надкин А. К., Осикова К. С., Решетников М. Е. – Бюл. № 10. – 15 с.
4. Проектирование синхронной электрической машины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха / А. Б. Захаренко, А. К. Надкин, К. С. Осикова // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020. – Т. 174. – № 1. – С. 15–18.

Поступила в редакцию 17.04.2020

Андрей Борисович Захаренко, начальник отдела общих научно-технических исследований, доктор технических наук, доцент, т. (495) 366-26-44.

Александр Каренович Надкин, кандидат технических наук, научный сотрудник, т. (495) 366-54-24.

Кристина Сергеевна Осикова, аспирант, инженер, т. (495) 366-01-47.

*E-mail: otde118@mcc.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).*

METHODS OF MAGNETIZATION AND ASSEMBLY OF HALBACH RINGS OF SYNCHRONOUS MACHINE ROTORS

A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin, K. S. Osikova

A known method of magnetization of a rotor that uses the full Halbach scheme of location of permanent magnet magnetization vectors suggested in a patent of the General Electric Company (USA) has been analyzed in terms of possibility of ensuring the sinusoidal distribution of magnetic induction in the air gap. A new design of an electrical machine with a rotor constructed according to a simplified Halbach scheme that allows increasing the maximum value of magnetic induction in the air gap as compared to the known electrical machines has been suggested. A new and considerably advanced method of magnetization and assembly of a rotor that uses a simplified Halbach scheme, which allows constructing a reaction wheel with a rotor having high moment of inertia and high specific indices due to the increase of induction in the machine winding area by more than 1.5 times as compared to traditional design solutions, has also been suggested.

Key words: permanent magnet, Halbach ring, magnetization method.

References

1. Patent of invention No. 2412516 Russian Federation. System and method for magnetization of permanent magnet rotors in electrical machines : No. 2006110348 : appl. 30.03.2006 : publ. 20.10.2007 / Stephens Ch.M.; patent holder: General Electric Company (USA). – Bul. No. 29. – 15 p.
2. Utility model patent No. 196343 Russian Federation. Electrical machine with a rotor constructed according to Halbach scheme : No. 2019143130 : appl. 23.12.2019 : publ. 26.02.2020 / Zakharenko A. B., Nadkin A. K., Osikova K. S., Reshetnikov M. E. – Bul. No. 6. – 9 p.
3. Patent of invention No. 2718537 Russian Federation. Method of magnetization and assembly of Halbach ring of electrical machine rotor (variants) : No. 2019139427 : appl. 04.12.2019 : publ. 08.04.2020 / Zakharenko A. B., Nadkin A. K., Osikova K. S., Reshetnikov M. E. – Bul. No. 10. – 15 p.

4. Designing a synchronous electrical machine with permanent magnets magnetized according to Halbach scheme / A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin, K. S. Osikova // Matters of Electromechanics. VNIIEM Proceedings. – Moscow : ‘VNIIEM Corporation’ JC, 2020. – Vol. 174. – No. 1. – Pp. 15 – 18.

Andrei Borisovich Zakharenko, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Head of Department, Associate Professor, tel.: +7 (495) 366-26-44.

Aleksandr Karenovich Nadkin, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Researcher, tel. +7 (495) 366-54-24.

Kristina Sergeevna Osikova, PG Student, Engineer, tel. +7 (495) 366-01-47.

E-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.

(JC «VNIIEM Corporation»).