

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, НАМАГНИЧЕННЫМИ ПО СХЕМЕ ХАЛЬБАХА

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

В составе системы ориентации космических аппаратов широко применяются двигатели-маховики на основе синхронных машин с постоянными магнитами. Одним из основных требований к подобным двигателям является высокое удельное значение момента и мощности. Обычно в таких двигателях отсутствует стальной магнитопровод статора, а якорные обмотки выполнены из плоских катушек, что приводит к увеличению немагнитного зазора. По этой причине повышение индукции в зазоре становится важной задачей при проектировании. Рассмотрена методика проектирования и конструкция магнитной системы двигателя-маховика с ротором, созданным по схеме Хальбаха. Проведено сравнение предлагаемой конструкции с известным аналогом численным методом. Предлагаемая конструкция позволяет существенно увеличить значение индукции в воздушном зазоре и улучшить удельные энергетические показатели двигателя-маховика.

Ключевые слова: двигатель-маховик, магнитная сборка Хальбаха, моделирование.

В настоящее время предложено множество новых конструктивных исполнений ротора синхронных электрических машин с постоянными магнитами, в том числе использующими явление сверхпроводимости [1]. Среди них следует отметить конструкцию, определяющую расположение векторов намагниченности постоянных магнитов ротора «по схеме Хальбаха» [2]. Одной из её особенностей является концентрация магнитного потока и магнитной индукции в воздушном зазоре. При этом в известных литературных источниках отсутствует методика проектирования синхронной электромашин, созданной без использования явления сверхпроводимости, позволяющая повысить индукцию в воздушном зазоре до 1,5 Тл и более для достижения наилучших удельных показателей. Эта задача особенно актуальна для создания двигателя-маховика космического назначения.

Целью настоящей статьи является создание двигателя-маховика с возбуждением от постоянных магнитов, имеющего отношение «Максимальная полезная мощность/масса» и «Максимальный момент/масса» лучше, чем у аналога. Задачами настоящей статьи являются:

- создание методики проектирования вышеупомянутого двигателя-маховика;
- проектирование двигателя-маховика и сравнение его с аналогом.

В работе [3] предложена новая конструкция синхронной машины с постоянными магнитами (рис. 1).

Активная часть машины состоит из двух колец постоянных магнитов – внутреннего 1 и внешнего 2, закреплённых на ярмах, между которыми размещена плоская сосредоточенная обмотка якоря. Вектора намагниченности постоянных магнитов во внешнем 2 и внутреннем 1 кольцах расположены

по схеме Хальбаха. Кроме того, направление намагниченности на внутреннем и внешнем кольцах Хальбаха должны быть согласованы так, чтобы магнитный поток, созданный постоянными магнитами внутреннего и внешнего колец, складывался. Для концентрации магнитного потока в зоне обмотки электромашин с внутренней стороны внутреннего кольца Хальбаха расположено внутреннее ярмо 3 из ферромагнитного материала, с внешней стороны внешнего кольца Хальбаха расположено внешнее ярмо 4 из ферромагнитного материала. Для уменьшения потока рассеяния в обмотке 5 должны отсутствовать ферромагнитные элементы.

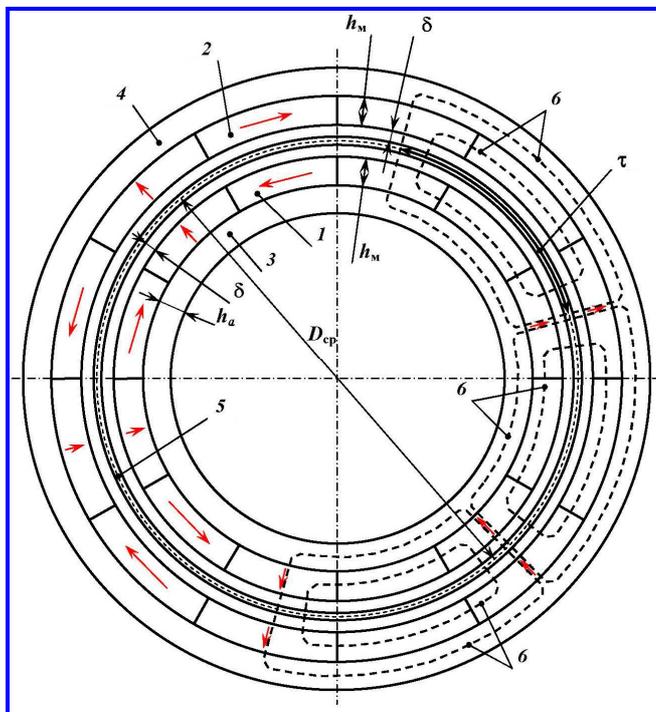


Рис. 1. Поперечное сечение электромашин с ротором, созданным по схеме Хальбаха

Высота ярем 3 и 4 должна быть подобрана таким образом, чтобы магнитная индукция в них не превышала индукцию насыщения материала, из которого они изготовлены. Силовые линии b магнитного потока, сосредоточенные в постоянных магнитах и ферромагнитных ярмах, показаны на рис. 1 пунктирными линиями для трех полюсов электромашины с числом полюсов $2p = 6$.

На рис. 1 также обозначены: высота постоянных магнитов h_m , высота ярма h_a , величина воздушного зазора δ , полюсное деление τ , средний диаметр обмотки якоря D_{cp} . Красными стрелками указаны направления векторов намагниченности постоянных магнитов.

Методика проектирования в общем случае должна включать следующие этапы:

1. Выбор диаметра двигателя исходя из назначения и особенностей системы электропривода.
2. Выбор конструкции крепления ротора, например, консольной.
3. Анализ качеств точности, допусков и посадок изготовления деталей на основе возможностей имеющегося оборудования. Определение минимально возможного зазора между статором и ротором на основе анализа допусков.
4. Вариация числа полюсов, высот постоянных магнитов и ярем ротора, а также обмотки статора для максимизации индукции в воздушном зазоре.
5. Выбор активной длины двигателя исходя из необходимого вращающего момента.

Проектирование двигателя-маховика с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха, было проведено на основе аналогии с двигателем-маховиком ДМ1-20. Исходя из возможности вписывания в конструкцию аналога был выбран средний диаметр обмотки $D_{cp} = 100$ мм. На основе анализа технологических возможностей производства (качеств точности, допусков и посадок изготовления деталей) выбрано значение величины воздушного зазора между магнитами и катушками $\delta = 0,5$ мм. В процессе проектирования варьировались следующие независимые переменные: $6 \leq 2p \leq 12$; $2 \leq h_m \leq 17$ мм; $0 \leq h_a \leq 8$ мм.

В качестве примера на рис. 2 приведено решение модельной задачи магнитостатики для одного из рассматриваемых вариантов схем магнитной системы. Внешний диаметр $D_{внеш} = 142$ мм, средний диаметр по воздушному зазору $D_\delta = 100$ мм, толщина обмотки в радиальном направлении

$h_{об-ки} = 1$ мм, толщина внутреннего ярма $h_{a1} = 2$ мм, внешнего $h_{a2} = 3$ мм, толщина магнитов $h_m = 17$ мм, величина немагнитного зазора между магнитами $\delta = 2$ мм, длина магнитной системы в осевом направлении $l_\delta = 5$ мм. Число полюсов $2p = 12$; число катушек на полюс и фазу $q = 1/4$, трехфазная обмотка, три катушки в фазе, витков в катушке 13.

Зависимости индукции в среднем сечении обмотки якоря от линейной координаты внутри полюсного деления построены для высот постоянных магнитов 2, 5, 8, 11, 14, 17 мм (рис. 3) для $2p = 12$. График показывает, что увеличение высоты магнита с равным шагом приводит ко всё меньшему увеличению магнитной индукции. Поэтому увеличение высоты магнита свыше 17 мм нецелесообразно.

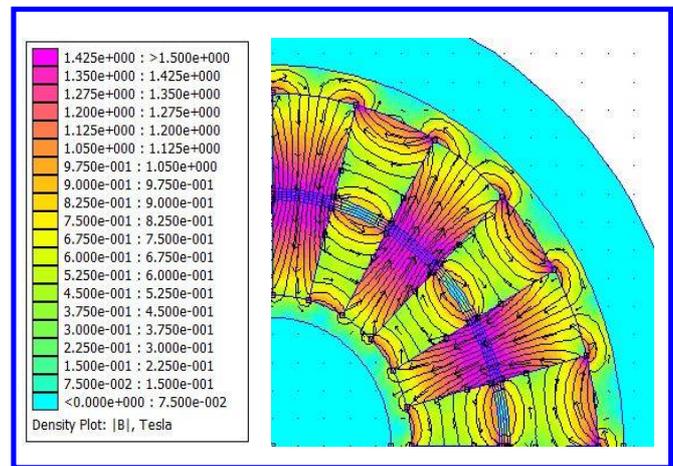


Рис. 2. Распределение индукции в поперечном сечении электромашины

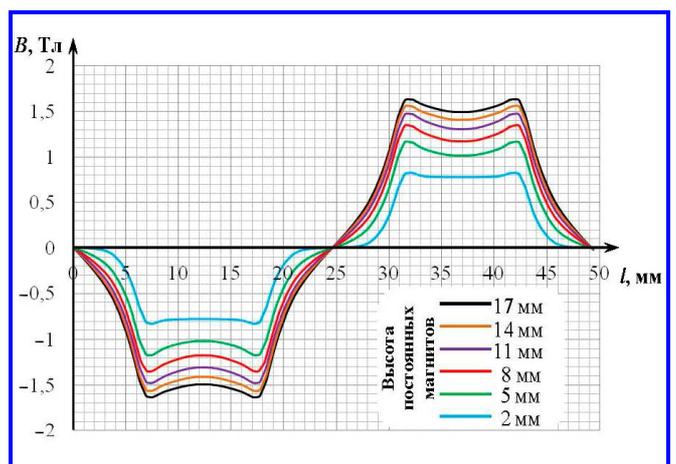


Рис. 3. Зависимости индукции в среднем сечении обмотки якоря от линейной координаты на полюсном делении

Таблица

Параметры рассмотренных магнитных систем двигателей

Параметр	Магнитная система		
	ДМ1-20	Хальбах, ферромагнитные ярма	Хальбах, неферромагнитные ярма
Внешний диаметр, мм	142	142	142
Осевая длина, мм	5	5	5
Индукция в зазоре, Тл	0,57	1,49	1,45
ЭДС _{xx} , В (амп. фаз.)	30	17,87	17,59
Ток, А (амп. фаз.)	1	10	10
Момент, Н·м	0,093	0,376	0,374
Механическая мощность, Вт	68	276	274
Электрические потери, Вт	0,43	1	1
Магнитные потери, Вт	8,75	0	0
$P_{\text{мех}}/(P_{\text{мех}}+P_{\text{эл}}+P_{\text{маг}})$	0,881	0,996	0,996
Масса магнитной системы, кг	0,141	0,493	0,427
$M_{\text{уд}}$, Н·м/кг	0,660	0,763	0,876
$P_{\text{уд}}$, кВт/кг	0,482	0,560	0,642

Результаты сравнения разработанных магнитных систем двигателей с аналогом ДМ1-20 приведены в таблице. При моделировании были заданы одинаковые свойства активных материалов для всех рассматриваемых моделей, частота вращения ротора $n = 7000$ об/мин, величина плотности тока в обмотках 10 А/мм^2 , количество витков в катушках $w = 13$.

Таким образом, при одинаковых габаритных размерах предлагаемые магнитные системы двигателей выгодно отличаются от аналога большими значениями удельных моментов и мощностей отсутствием магнитных потерь и большей эффективностью.

Выводы

1. Предложена новая конструкция электромашины с ротором, созданным по схеме Хальбаха, позволяющая увеличить максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, по сравнению с машинами традиционных конструкций.

2. Создан алгоритм и методика оптимального проектирования электрической машины, позволившие получить магнитную индукцию в воздуш-

ном зазоре электромашины с ротором, созданным по схеме Хальбаха, 1,5 Тл.

3. Разработан двигатель-маховик, позволяющий улучшить удельную мощность в 1,33 раз, удельный момент в 1,33 раз, эффективность в 1,13 раз по сравнению с известным аналогом.

Литература

1. Голованов Д. В. Синхронные ВТСП двигатели с постоянными магнитами : специальность 05.09.01: «Электромеханика и электрические аппараты» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Голованов Дмитрий Викторович. – Москва : МАИ (ГТУ), 2009. – 140 с.
2. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material / K. Halbach // Nuclear instruments & methods. – Netherlands : Elsevier, 1980. – Vol. 169. – Iss. 1. – P. 1 – 10. – DOI : 10.1016/0029-554X(80)90094-4.
3. Патент на полезную модель № 196343 Российская Федерация, МПК H02K 21/00(2006.01), H02K 21/02(2006.01). Электромашина с ротором, созданным по схеме Хальбаха : № 2019143130 : заявл. 23.12.2019 : опубл. 26.02.2019 / А. Б. Захаренко, А. К. Надкин, К. С. Осикова, М. Е. Решетников. – 9 с.

Поступила в редакцию 13.02.2020

Андрей Борисович Захаренко, доктор технических наук, начальник отдела, 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»).*

DESIGNING SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS MAGNETIZED ACCORDING TO HALBACH SCHEME

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

Flywheel motors based on synchronous machines with permanent magnets are widely used in the attitude control system of spacecrafts. One of the main requirements for such motors is a high specific value of torque and power. Typically, in such motors there is no steel stator magnetic circuit, and the armature windings are made of flat coils, which leads to increase of the non-magnetic gap. For that reason, increasing the induction in the gap becomes an important design task. The design method and structure of magnetic system of a flywheel motor with rotor created according to Halbach scheme have been analyzed. The proposed structure has been compared to a famous analog using numerical procedure. The proposed design can significantly increase the induction value in the air gap and improve the specific energy values of the flywheel motor.

Key words: flywheel motor, Halbach array, modeling.

References

1. Golovanov D. V. Synchronous HTS Motors with Permanent Magnets: category 05.09.01 'Electromechanics and electrical devices': thesis for doctoral degree in technical sciences / Golovanov Dmitri Viktorovich. – Moscow: MAI (State Technical University), 2009. – 140 p.
2. Halbach K. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material / K. Halbach // Nuclear instruments & methods. – Netherlands: Elsevier, 1980. – Vol. 169. – Iss. 1. – P. 1 – 10. – DOI: 10.1016/0029-554X(80)90094-4.
3. Utility model patent No. 196343 Russian Federation, IPC H02K 21/00(2006.01), H02K 21/02(2006.01).
Electric machine with rotor, created according to Halbach scheme: No. 2019143130: applied on 23.12.2019: published on 26.02.2019 / A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin, K. S. Osikova, M. E. Reshetnikov. – 9 p.

*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: otde118@mcc.vniiem.ru.
(JC «VNIEM Corporation»).*