

УДК 621.313

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, НАМАГНИЧЕННЫМИ ПО СХЕМЕ ХАЛЬБАХА

В. Я. Геча, А. Б. Захаренко, А. К. Надкин

Рассматриваются электрические машины с высокими удельными показателями для применения на летательных аппаратах. Проводится анализ различных вариантов расположения векторов намагниченности постоянных магнитов синхронных машин с внешним ротором. Сравниваются результаты численных расчетов поля и гармонического анализа индукции в зазоре для различных конструкций магнитных систем, приводятся рекомендации по выбору наиболее перспективного варианта расположения векторов намагниченности. Выбранный вариант позволяет создать электрическую машину с наилучшими удельными показателями момента и мощности. Рассматриваются вопросы выбора главных размеров электрических машин с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха через выражение удельной силы, и через выражение машинной постоянной Арнольда. Даны рекомендации по выбору наилучшего соотношения между диаметром и осевой длиной рассматриваемых электрических машин.

Ключевые слова: постоянные магниты, синхронная машина, магнитная сборка Хальбаха.

При проектировании электрических машин, предназначенных для эксплуатации на летательных (в том числе орбитальных космических) аппаратах, особенно необходимо стремиться к улучшению удельных показателей. Наиболее перспективной с точки зрения удельных показателей является электрическая машина с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха [1], с внешним ротором. Анализ таких машин посвящено множество зарубежных и отечественных работ, например [2 – 4], однако, вопросы выбора главных размеров и оптимальной схемы намагничивания Хальбаха остались недостаточно проработанными.

Целью работы является определение главных размеров электромашины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха, с внешним ротором.

Задачами работы являются:

1) выбор наиболее перспективного варианта расположения векторов намагниченности при создании роторов с постоянными магнитами;

2) создание алгоритма выбора главных размеров электрической машины с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха.

Выбор наиболее перспективного варианта расположения векторов намагниченности. Варианты расположения векторов намагниченности постоянных магнитов показаны на примере ротора с $2p = 8$ на рис. 1. Для выбора наиболее перспективного варианта расположения векторов намагниченности были проведены расчеты магнитного поля методом конечных элементов в некоммерческой программе Femm. Расчеты проводились для машины с $2p = 8$ с внешним ротором со следующими основными размерами: внешним диаметром ротора 130 мм, внутренним диаметром ротора 100 мм, высотой постоянных магнитов 5 мм, воздушным зазо-

ром 1 мм, постоянные магниты неодим – железо – бор (Nd – Fe – B) марки N40 [5].

Распределения магнитного поля для расчетных моделей в соответствии вариантами расположения векторов намагниченности, показанными на рис. 1, приведены на рис. 2. В расчетных моделях статоры приняты без пазов для выявления особенностей распределения магнитного поля, вызванного постоянными магнитами.

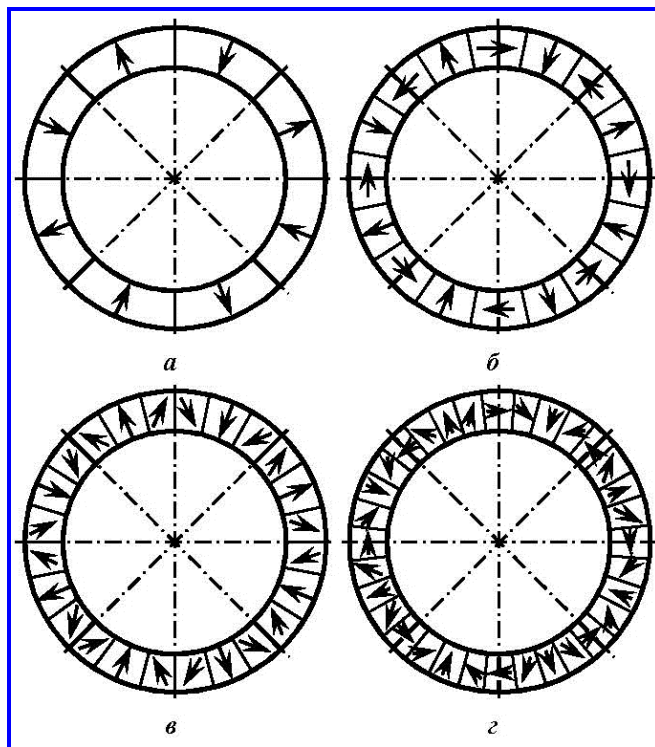


Рис. 1. Расположение векторов намагниченности постоянных магнитов индукторов роторов с $2p = 8$: а – радиальное намагничивание; б – упрощенная схема Хальбаха; в, з – варианты полной схемы Хальбаха

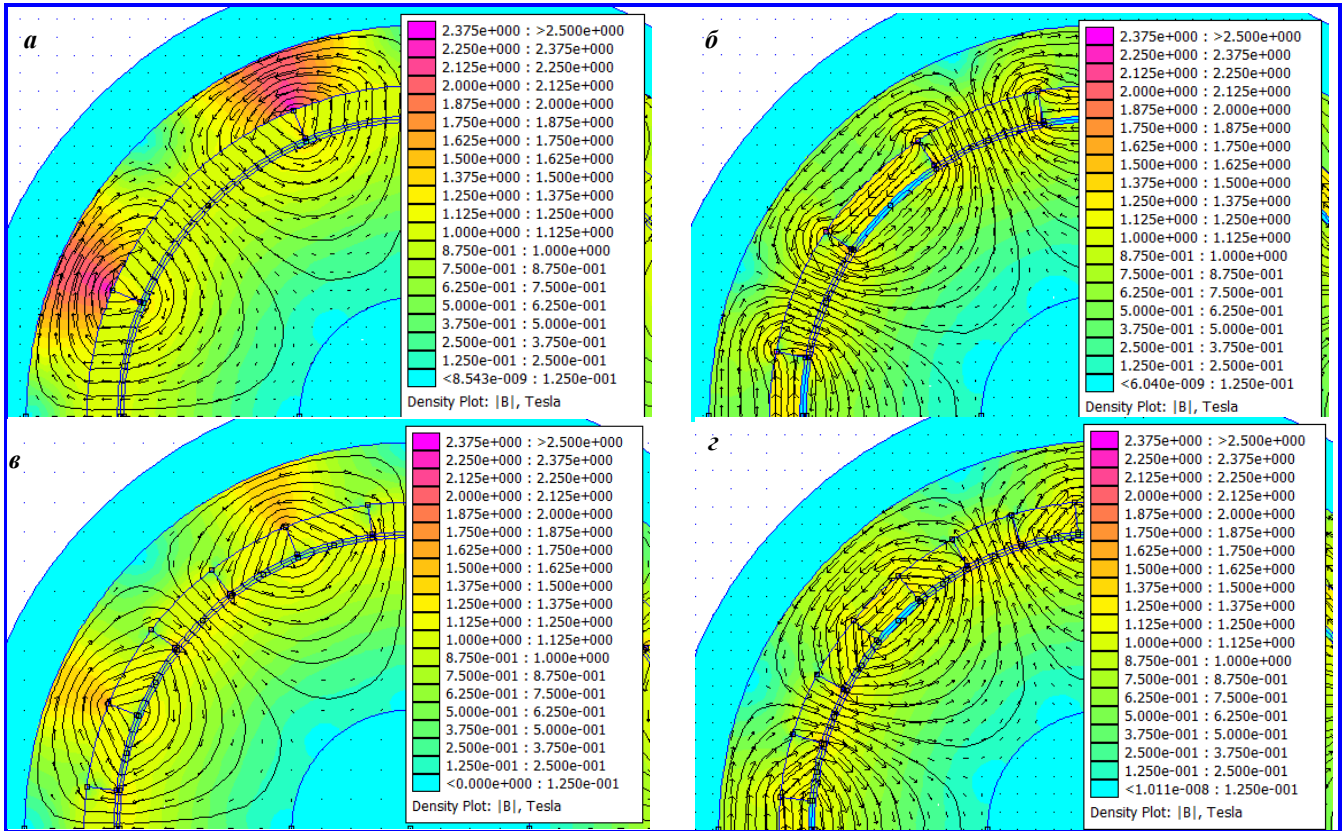


Рис. 2. Картины распределения магнитного поля для различных вариантов расположения векторов намагниченности. Масштаб магнитной индукции одинаковый

Результаты расчетов, приведенные на рис. 2, *а*, соответствуют расположению векторов намагниченности рис. 1, *а* (один магнит на полюс); рис. 2, *б* – рис. 1, *б* (три магнита на полюс, тангенциально намагниченные магниты); рис. 2, *в* – рис. 1, *в* (три магнита на полюс); рис. 2, *з* – рис. 1, *з* (пять магнитов на полюс, тангенциально намагниченные магниты).

При традиционном расположении векторов намагниченности (рис. 1, *а* – рис. 2, *а*) увеличение высоты постоянных магнитов ведет к менее выраженному увеличению индукции в зазоре, ухудшению формы поля и к насыщению ярма ротора. В вариантах сборки Хальбаха (рис. 1, *б* – *з* – рис. 2, *б* – *з*) увеличение толщины магнитов ведет к увеличению индукции в зазоре, улучшению формы поля и к уменьшению насыщения ярма ротора.

Графики распределения радиальной составляющей магнитной индукции B по среднему диаметру воздушного зазора приведены на рис. 3.

На рис. 4 показаны спектральные составы индукции рассматриваемых магнитных систем, в

табл. 1 показаны амплитуды $B_{\delta v}$ наиболее значимых гармоник v и их фазовые углы Θ_v .

Из рис. 3 видно, что создание полюса из набора постоянных магнитов приводит к негладкому распределению радиальной составляющей индукции,

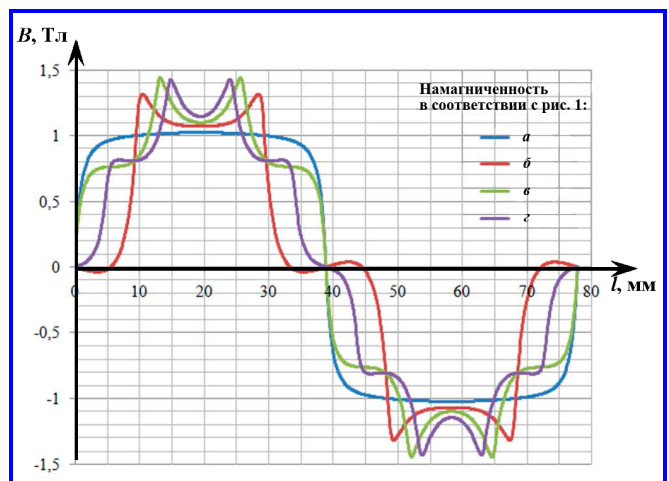


Рис. 3. Графики распределения радиальной составляющей индукции по среднему диаметру воздушного зазора

обусловленному рассеянием между соседними постоянными магнитами. Для получения более гладкого распределения возможно применение магнитопластов, однако величина индукции в зазоре при этом уменьшится.

Проведенный анализ показывает, что наилучший гармонический состав индукции в зазоре обеспечивает сборка магнитов по схеме рис. 1, *з*. Также заметно, что при увеличении количества магнитных сегментов, форма поля больше приближается к синусу.

Следует отметить, что вариант упрощенной схемы Хальбаха с тремя магнитами на полюс, согласно рис. 1, *б*, и рис. 2, *б*, защищенный патентом на изобретение [6], имеет минимальное количество экстремумов. При этом он обеспечивает индукцию в зазоре 1,4 Тл. Схема рис. 1, *б* обладает приемлемым спектральным составом и является наиболее простой при сборке, по сравнению с другими рассмотренными схемами Хальбаха. Ее следует признать **наиболее перспективной**.

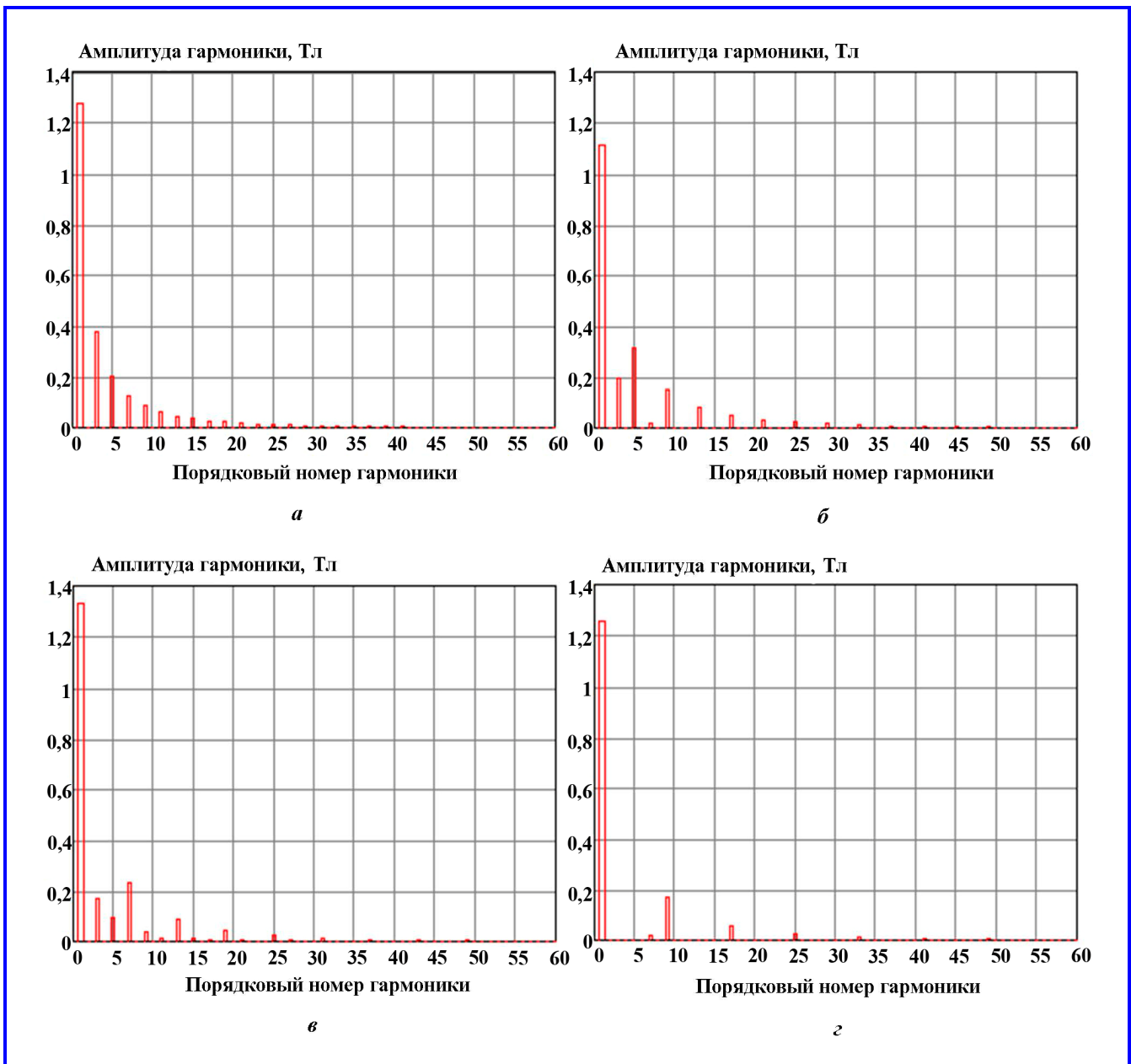


Рис. 4. Спектральный состав гармоник индукции в зазоре: *a* – по графику рис. 1, *a*; *б* – по графику рис. 1, *б*; *в* – по графику рис. 1, *в*; *з* – по графику рис. 1, *з*

Таблица 1

Амплитуды и фазовые углы наиболее значимых гармоник

Сборка по рис. 1, а			Сборка по рис. 1, б			Сборка по рис. 1, в			Сборка по рис. 1, г		
v	$B_{\delta v}$, Тл	Θ_v , эл. град.	v	$B_{\delta v}$, Тл	Θ_v , эл. град.	v	$B_{\delta v}$, Тл	Θ_v , эл. град.	v	$B_{\delta v}$, Тл	Θ_v , эл. град.
1	1,274	0,174	1	1,11	0,179	1	1,332	0,2	1	1,259	0,177
3	0,373	0,519	3	0,192	180,542	3	0,171	0,5	7	0,019	181,359
5	0,2	0,864	5	0,314	180,904	5	0,092	0,8	9	0,17	181,599
7	0,126	1,209	7	0,017	1,501	7	0,229	1,2	17	0,057	3,027
9	0,086	1,545	9	0,15	1,638	9	0,038	1,4	25	0,025	184,489
11	0,062	1,886	13	0,082	182,417	11	0,015	1,6	33	0,013	5,962
13	0,046	2,224	17	0,05	3,233	13	0,088	2,3	41	0,007	187,015
15	0,036	2,58	21	0,032	183,963	15	0,015	2,4			
17	0,028	2,954	25	0,022	4,474	19	0,042	3,3			
19	0,022	3,345				25	0,023	4,3			
21	0,018	3,712				31	0,014	5,5			

Также необходимо отметить, что достичь синусоидального распределения поля в зазоре можно и при традиционном расположении магнитов подбором наилучшего сочетания длины и радиуса полюсной дуги. Для примера на рис. 5 показана схема магнитной системы (а), картина поля (б), график индукции (в) в зазоре и ее гармонический состав (г). Обычно рекомендуется выбирать коэффициент полюсного перекрытия в диапазоне 0,65 – 0,75 и отношение величины зазора под краем полюса к

зазору под серединой полюса $1,6 \div 2,5$. Таким образом, подбирая описанные величины, можно обеспечить синусоидальную форму поля в зазоре машины с традиционной магнитной сборкой. При этом уменьшается использование объема активной части электрической машины и, следовательно, удельные показатели момента и мощности у двигателей с подобной магнитной схемой окажутся меньше, чем у аналогичных двигателей с магнитными схемами по рис. 1, б – г.

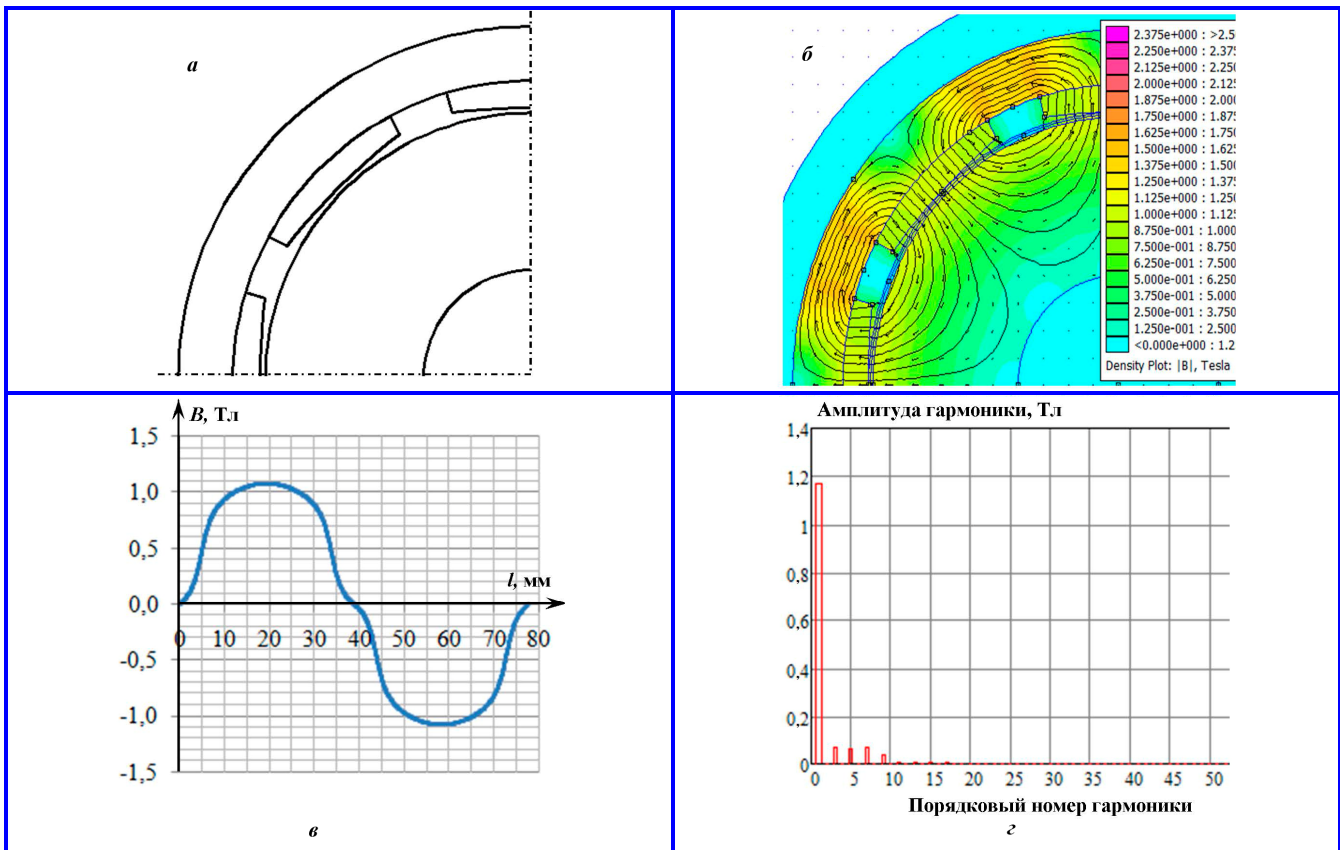


Рис. 5. Пример магнитной системы с традиционной сборкой магнитов, обеспечивающей распределение поля, близкое к синусоидальной форме: а – схема магнитной системы; б – картина поля; в – график индукции в зазоре; г – гармонический состав

Выбор главных размеров. В работе [7] Г. Н. Петров вводит понятие тангенциальной (касательной) силы, действующей на единицу поверхности ротора. Касательная сила зависит от мощности машины, но даже у самых крупных машин не превышает 0,03 – 0,04 МПа:

$$F_{уд} = \frac{2M}{\pi D_{вн}^2 l_{\delta}}, \quad (1)$$

где M – момент, Н·м; $D_{вн}$ – внутренний диаметр ротора, м; l_{δ} – осевая длина, м.

Определено, что характерное значение удельной силы $F_{уд}$ синхронного двигателя с постоянными магнитами со схемой Хальбаха может достигать 0,055 МПа. Внутренний диаметр ротора обычно определяется, исходя из конструкции привода и условий охлаждения машины. Тогда можно определить осевую длину, как:

$$l_{\delta} = \frac{2M}{\pi D_{вн}^2 F_{уд}} = \frac{36,4M}{\pi D_{вн}^2}. \quad (2)$$

Известно общепринятое выражение машинной постоянной Арнольда C_A [8]:

$$C_A = \frac{D^2 l_{\delta} \Omega}{P'} = \frac{2}{\pi \alpha_{\delta} k_B k_{\text{об}} A B_{\delta}}, \quad (3)$$

где D – диаметр якоря, м; Ω – частота вращения, рад/с; P' – расчетная электромагнитная мощность, Вт; A – линейная нагрузка, А/м; k_B – коэффициент формы поля; $k_{\text{об}}$ – обмоточный коэффициент.

Определив $C_A = f(P')$, можно получить базу для проектирования машин со сборкой Хальбаха.

Исходя из формулы для машинной постоянной Арнольда, осевую длину можно определить из выражения:

$$l_{\delta} = \frac{2P'}{\pi \alpha_{\delta} k_B k_{\text{об}} A B_{\delta} D^2 \Omega}, \quad (4)$$

из которого линейная нагрузка определяется формулой $A = mIw/D$, где m – число фаз обмотки якоря; I – фазный ток; w – число последовательно соединенных витков в фазе; а расчетная электромагнитная мощность –

$$P' = mIE = \frac{P_2 k_E}{\eta \cos(\phi)}, \quad (5)$$

где E – ЭДС обмотки якоря, В; P_2 – мощность на валу двигателя, Вт; k_E – отношение ЭДС к номи-

нальному напряжению; η – КПД; $\cos(\phi)$ – коэффициент мощности.

Осевую длину можно также определить из выражения с использованием машинной постоянной C_A :

$$l_{\delta} = \frac{C_A P'}{D^2 \Omega}. \quad (6)$$

Проверкой правильности выбора диаметра и длины машины является значение отношения $\lambda = l_{\delta}/\tau$, где полюсное деление определяется по формуле $\tau = \pi D/2p$. Число полюсов выбирается, исходя из частоты вращения ротора и требуемой по условиям системы управления электрической частоты.

Определение диапазона λ для машин со сборкой Хальбаха является важной задачей для разработки методики их проектирования. Значение λ характеризует основные размерные соотношения в машине. Большие λ имеют машины относительно малого диаметра и большой длины, и, наоборот, малые значения λ – короткие машины с большим диаметром. В первом случае машины имеют меньшую массу и меньшую высоту оси вращения. В них лучше используется медь, так как длина лобовых частей катушек по сравнению с длиной их пазовых частей становится меньше. Момент инерции машин меньше при больших λ , что особенно важно при проектировании двигателей, предназначенных для работы с частыми пусками. Однако, относительное увеличение длины машины при больших λ затрудняет условия их охлаждения. В машинах небольших габаритов с увеличением λ возникают трудности с выполнением необходимого для нормальной работы числа пазов. Анализ этих зависимостей и опыт эксплуатации позволили определить для различных типов машин диапазон значений λ , при которых обеспечиваются их экономичность и хорошие эксплуатационные данные. Эти рекомендации служат критерием проверки правильности предварительного выбора диаметра для проектируемой машины [8].

Сравним величину электромагнитного момента традиционной машины с машиной со сборкой Хальбаха. Для этого, в качестве примера, рассмотрим машины с одинаковыми габаритами: внешним диаметром 130 мм, и осевой длиной 100 мм. Амплитудное значение тока якоря одинаковое и составляет 280 А. Магнитные системы рассматриваемых машин показаны на рис. 6. В обоих вариантах: внешний диаметр 130 мм; осевая длина 100 мм; число полюсов $2p = 8$; схема обмотки – звезда; $q = 3/8$; число витков на зубце 6.

Полученные графики момента показаны на рис. 7.

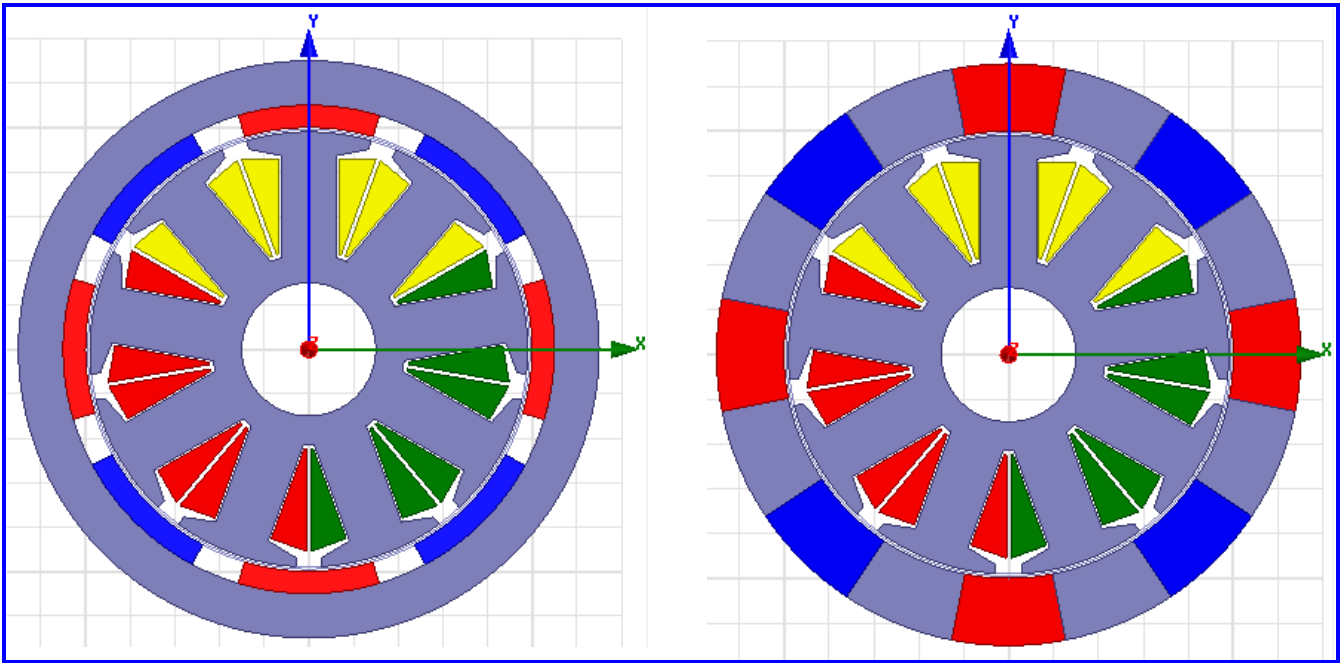


Рис. 6. Магнитная система машины традиционной конструкции (а) и машины со схемой Хальбаха (б)

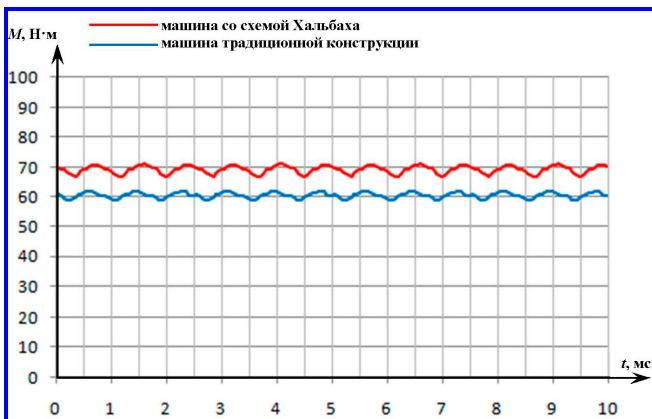


Рис. 7. График момента машины традиционной конструкции и машины со схемой Хальбаха

Значение момента машины со схемой Хальбаха составляет 69,234 Н·м при пульсациях 4,456 Н·м, момент машины традиционной конструкции 60,725 Н·м при пульсациях 3,088 Н·м. Таким образом, в рассмотренном примере момент машины со схемой Хальбаха на 14% больше, чем момент аналогичной машины в таких же габаритных размерах традиционной конструкции.

Выводы

1. Рассмотрены различные варианты выполнения роторов синхронных машин с постоянными магнитами. Получены картины поля, графики и спектральные составы индукции в воздушном за-

зоре для роторов с традиционной сборкой из радиально намагниченных магнитов, упрощенной сборкой Хальбаха и двумя вариантами полной сборки Хальбаха.

2. Установлено, что наиболее перспективным является вариант ротора с расположением магнитов по упрощенной схеме Хальбаха (рис. 1, б), объединяющий в себе преимущества полных схем (1, в и г) и относительную простоту сборки.

3. Рассмотрен способ создания синусоидального распределения поля в зазоре электрической машины с традиционными радиально намагниченными магнитами. Показано, что удельные показатели момента и мощности у двигателей с подобными магнитными схемами окажутся меньше, чем у аналогичных двигателей с магнитными схемами Хальбаха.

4. Приведены рекомендации по выбору главных размеров машин со схемой Хальбаха по параметру тангенциальной (касательной) силы, действующей на единицу поверхности ротора и по величине машинной постоянной Арнольда.

5. Приведены рекомендации по выбору наилучшего соотношения между диаметром и осевой длиной электромашин с постоянными магнитами, намагниченными по схеме Хальбаха.

6. В рассмотренном примере момент машины со схемой Хальбаха на 14% больше, чем момент аналогичной машины традиционной конструкции.

Литература

1. 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.
2. Design and Analysis of Halbach Ironless Flywheel BLDC Motor/Generators / Kai Liu, Ming Yin, Wei Hua [et al.] // IEEE transactions on magnetics. – 2018. – 5 p. – URL : http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html (дата обращения: 27.07.2020).
3. Analysis on Toothless Permanent Magnet Machine with Halbach Array / Xu Yanliang, Feng Kaijie // IEEE transactions on magnetics. – 2006. – 5 p. – URL : http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html (дата обращения: 27.07.2020).
4. 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.
5. Неодимовый магнит диск D19xh10 N40 // ООО «Полимагнит» [сайт]. – 2019. – URL : http://www.ndfeb.ru/catalog/neodymium_magnets (дата обращения: 27.07.2020).
6. Патент на изобретение № 2720233 Российская Федерация, МПК H02K 21/12(2006.01), H02K 16/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Электромашин с ротором, созданным по схеме Хальбаха : № 2019143132 : заявл. 23. 12.2019: опубл. 28.04.2020 / Захаренко А. Б., Надкин А. К., Осикова К. С. [и др.]. – Бюл. № 13. – 11 с.
7. Петров Г. Н. Электрические машины : [в 3 томах] / Г. Н. Петров. – Москва ; Ленинград : Государственное энергетическое издательство, 1963. – 3 т.
8. Копылов И. П. Проектирование электрических машин : учебник для бакалавров / И. П. Копылов; ответственный редактор И. П. Копылов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 767 с.

Поступила в редакцию 04.08.2020

Владимир Яковлевич Геча, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, главный конструктор по динамике и прочности космических аппаратов, т. (495) 365-26-69, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.

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

Александр Каренович Надкин, кандидат технических наук, научный сотрудник, т. (495) 366-54-24, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

DESIGNING AN ELECTRICAL MACHINE WITH PERMANENT MAGNETS MAGNETIZED ACCORDING TO HALBACH SCHEME

V. Ia. Gecha, A. B. Zakharenko, A. K. Nadkin

The article describes electrical machines with high specific characteristics for application on aircraft and spacecraft. Different locations of magnetization vectors of permanent magnets for synchronous machines with an external rotor are analyzed. The results of the numerical calculation of the field and harmonic analysis of magnetic induction in the air gap for different magnetic system designs are compared, recommendations on selection of the optimal location for the magnetization vectors. The selected option allows developing an electrical machine with the best specific momentum and power. The selection of overall dimensions of electrical machines with permanent magnets magnetized according to Halbach scheme is analyzed using the specific force expression and Arnold's coefficient expression. Recommendations on selection of the best relation between the diameter and axial length of the analyzed electrical machines are provided.

Key words: permanent magnets, synchronous machine, Halbach array.

References

1. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material / K. Halbach // Nuclear instruments & methods. – Netherlands : Elsevier, 1980. – Vol. 169. – Iss. 1. – Pp. 1 – 10. – DOI: 10.1016/0029-554X(80)90094-4.
2. Design and Analysis of Halbach Ironless Flywheel BLDC Motor/Generators / Kai Liu, Ming Yin, Wei Hua [et al.] // IEEE transactions on magnetics. – 2018. – 5 p. – URL : http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html (date of access: 27.07.2020).
3. Analysis on Toothless Permanent Magnet Machine with Halbach Array / Xu Yanliang, Feng Kaijie // IEEE transactions on magnetics. – 2006. – 5 p. – URL : http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.html (date of access: 27.07.2020).
4. Golovanov D.V. Synchronous high-temperature semiconductor motors with permanent magnets : specialty 05.09.01 'Electromechanics and electrical devices' : Thesis for the Degree of Candidate of Technical Sciences / Golovanov Dmitrii Viktorovich. – Moscow : MAI (State Technical University), 2009. – 140 p.

5. Neodymium magnet disk D19xh10 N40 // Polymagnet LLC [website]. – 2019. – URL : http://www.ndfeb.ru/catalog/neodymium_magnets (date of access: 27.07.2020).
6. Patent of invention No. 2720233 Russian Federation, МПК H02K 21/12(2006.01), H02K 16/02(2006.01), H02K 1/27(2006.01). Electrical machine with a rotor developed according to Halbach scheme : No. 2019143132 : appl. 23.12.2019: publ. 28.04.2020 / Zakharenko A.B., Nadkin A.K., Osikova K.S. [et al.]. – Bul. No. 13. – 11 p.
7. Petrov G.N. Electrical machines : [in 3 volumes] / G.N. Petrov. – Moscow ; Leningrad : State Power Engineering Publishing House, 1963. – 3 volumes.
8. Kopylov I. P. Designing of electrical machines : textbook for bachelors / I. P. Kopylov; responsible editor I. P. Kopylov. – 4th edition, revised and enlarged. – Moscow : Urait Publishing House, 2018. – 767 p.

*Vladimir Iakovlevich Gecha, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor,
Deputy Director General, tel.: (495) 365-26-69, e-mail: vgecha@hq.vniiem.ru.*

*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.
(JC «VNIEM Corporation»).*