

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПОЛЮСНОГО ДЕЛЕНИЯ И ШИРИНЫ РАДИАЛЬНО НАМАГНИЧЕННОГО ПОСТОЯННОГО МАГНИТА СИНХРОННОЙ ЭЛЕКТРОМАШИНЫ ПО КРИТЕРИЮ МАКСИМАЛЬНОЙ СИЛЫ

SELECTION OF THE OPTIMAL VALUE OF POLE WIDTH AND RADIAL MAGNETIZED PERMANENT MAGNET WIDTH OF SYNCHRONOUS ELECTRIC MACHINE ACCORDING TO THE CRITERION OF MAXIMUM FORCE

И. А. ТЕПЛЯКОВ, А. Б. ЗАХАРЕНКО

АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва, Россия

I. A. Teplyakov, A. B. Zakharenko

JSC «VNIIEM Corporation», Moscow, Russia

Аннотация. Для привода винтомоторных групп малых летательных аппаратов широко применяются электрические двигатели для привода воздушного винта. Наибольшее распространение получили электрические двигатели для привода воздушного винта с возбуждением от радиально намагниченных постоянных магнитов. Возбуждение от сборок Хальбаха постоянных магнитов позволяет сконцентрировать магнитный поток и добиться лучших массогабаритных показателей. Важной задачей является максимизация тангенциальной электромагнитной силы, действующей на два полюса электрического двигателя для привода воздушного винта, которая решена в двумерной постановке методом конечных элементов. Особенностью решенной задачи является варьирование ширины постоянного магнита b_{M1} , вектор намагниченности которого перпендикулярен воздушному зазору, при одинаковой ширине трех других постоянных магнитов, составляющих сборку Хальбаха на полюсном делении. В процессе решения задачи варьировались высоты постоянных магнитов и величины полюсного деления. Величины тока и плотности тока поддерживались постоянными. В результате проведенных расчетов получен ряд зависимостей относительной ширины постоянного магнита b_{M1}/τ от величины полюсного деления τ . Получена также область оптимальных значений b_{M1}/τ в зависимости от τ .

Ключевые слова: электрический двигатель привода воздушного винта, постоянные магниты, схема намагничивания Хальбаха.

Для цитирования: Тепляков И. А., Захаренко А. Б. Выбор оптимальной величины полюсного деления и ширины радиально намагниченного постоянного магнита синхронной электромашины по критерию максимальной силы // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 211. № 2. С. 3–8.

Annotation. Electric propeller drive motors are widely used to drive propeller-motor groups of small aircraft. The most widely used electric propeller drive motors are those with excitation from radially magnetized permanent magnets. Excitation from Halbach arrays of permanent magnets allows for concentrated magnetic flux and improved weight and size characteristics. An important objective is to maximize the tangential electromagnetic force acting on the two poles of the electric propeller drive motors, which is solved in a two-dimensional formulation using the finite element method. The peculiarity of the solved problem is the variation of the width of the permanent magnet b_{M1} , the magnetization vector of which is perpendicular to the air gap, with the same width of the other three permanent magnets that make up the Halbach assembly at the pole width. During the solution process, the heights of the permanent magnets and the pole width values were varied. The current and current density were maintained constant. The calculations yielded a series of relationships between the relative width of the permanent magnet b_{M1}/τ and the pole width value τ . The region of optimal values of b_{M1}/τ depending on τ was also obtained.

Key words: electric propeller drive motor, permanent magnets, Halbach array.

For citation: Teplyakov I. A., Zakharenko A. B. Selection of the optimal value of pole width and radial magnetized permanent magnet width of synchronous electric machine according to the criterion of maximum force // Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2026. Vol. 211. № 2. Pp. 3–8.

В винтомоторных группах малых летательных аппаратов широко применяются электрические двигатели, в том числе с радиальной намагниченностью постоянных магнитов. Возбуждение от постоянных магнитов, намагниченных по схеме Хальбаха, позволяет сконцентрировать магнитный поток и добиться лучших массогабаритных показателей. Традиционно ширина всех постоянных магнитов в сборке Хальбаха одинакова. Ранее было получено [1], что если ширина постоянного магнита в сборке Хальбаха, вектор намагниченности которого перпендикулярен воздушному зазору, отличается от ширины

других магнитов, то величина силы может быть увеличена по сравнению с «равноширинной» сборкой.

Задачей статьи является максимизация тангенциальной электромагнитной силы, действующей на два полюса электрического двигателя для привода воздушного винта (ЭДВВ), при варьировании ширины постоянного магнита, вектор намагниченности которого перпендикулярен воздушному зазору, отнесённой к полюсному делению, а также полюсного деления.

Трёхмерная постановка задачи моделирования позволяет наиболее точно рассчитать ЭДВВ мето-

дами компьютерного моделирования. Это связано с трехмерными (3D) эффектами: эффектом кривизны и краевым эффектом [2], которые не учтены в двухмерном анализе. Трехмерный анализ методом конечных элементов позволяет провести расчеты с более высокой точностью, однако такое моделирование занимает слишком много времени, чтобы его можно было использовать при проектировании, в котором рассчитываются сотни вариантов. Поэтому трехмерный анализ методом конечных элементов в этой статье не используется.

Расчетная модель. В связи с трудоемкостью трехмерного расчета моделирование ЭДВВ проводилось в двухмерной (2D) постановке. Принцип преобразования трехмерной геометрии ЭДВВ в двухмерную представлен на рис. 1: трехмерная модель «разсечена» плоскостью 1 в середине высоты сердечника, что позволяет получить поперечное сечение 2 ЭДВВ. Далее поперечное сечение 2 по среднему диаметру развернуто в линейную модель 3. При этом ширина и глубина активной части сердечника, а также полюсное деление – сохраняются. Это позволяет повысить скорость расчетов в программных пакетах конечно-элементного компьютерного моделирования, таких как *Ansys Maxwell*, и проводить расчеты ЭДВВ в 2D-постановке. С учетом симметрии полученной 2D-развертки расчетная модель может быть сокращена до двух полюсных делений.

Полученная расчетная модель ЭДВВ представлена на рис. 2. Заданы следующие материалы составных частей магнитной системы: постоянные магниты из материала неодим-железо-бор NdFeB, марки N40UH (коэрцитивная сила $H_c = 900$ кА/м), материал катушек обмотки – медь, в зазорах между статором и ротором – воздух, для ярем выбран немагнитный непроводящий материал, аналогичный воздуху в окружающем пространстве. Направления намагниченности постоянных магнитов на рис. 2 показаны стрелками, а также обозначены: h_M – высота постоянного магнита; τ – полюсное деление; b_{M1} , b_{M3} , b_{M2} , – ширина постоянных магнитов с различным направлением вектора намагниченности.

При расчетах варьировались: b_{M1} – ширина постоянного магнита, вектор намагниченности которого перпендикулярен воздушному зазору; τ – полюсное деление; при этом $b_{M2} = b_{M3} = (\tau - b_{M1})/3$.

На рис. 3 рассмотрен случай, когда направление тока в обмотке согласовано с положением ротора. В катушках фаз *A* и *C* задана плотность тока $J_1 = 5,6 \cdot 10^6$ А/м², в катушках фазы *B* плотность тока

$J = 0$ (отмечена зеленым цветом). При этом начала фаз обозначены знаком «+», а концы «-». Этот режим практически соответствует максимальной силе, действующей параллельно оси *x*.

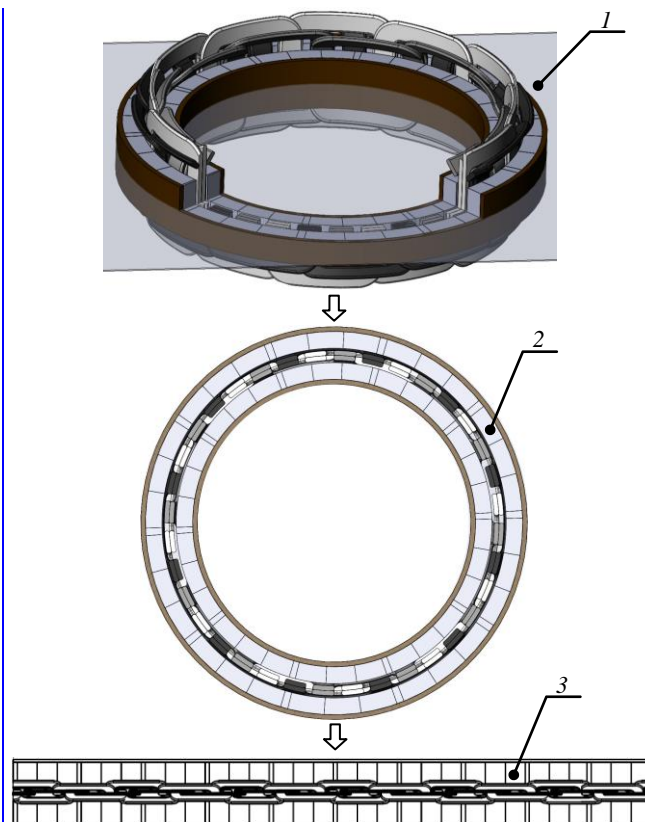


Рис. 1. Принцип преобразования трехмерной геометрии радиально намагниченного электрического двигателя для привода воздушного винта в двухмерную: 1 – трехмерная модель; 2 – поперечное сечение; 3 – двухмерная модель

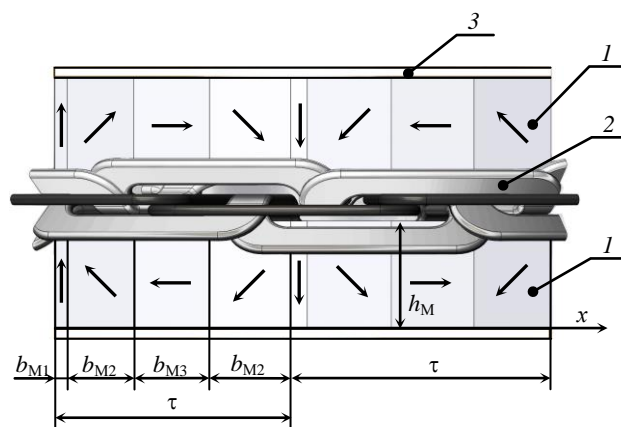


Рис. 2. Двухполюсная 2D-развертка активной части радиально намагниченного электрического двигателя для привода воздушного винта: 1 – постоянные магниты ротора; 2 – обмотка статора; 3 – ярмо ротора

Каждый расчет проводится для определённого значения высоты постоянного магнита. При расчетах были приняты значения плотности тока $J = 5,6 \dots 15,0 \text{ А/мм}^2$, необходимые для обеспечения охлаждения ЭДВВ воздушным винтом. Результатом расчета являлась электромагнитная сила в направлении оси x .

При построении расчетной модели установлены граничные условия (см. рис. 3 с результатами расчетов):

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

На рис. 3 обозначены: $h_{об}$ – высота обмотки; δ – величина воздушного зазора; $b_{об}$ – ширина катушки обмотки. Размер δ_1 моделирует ярмо и окружающее пространство за пределами роторов, этот размер должен быть выбран достаточно большим, чтобы не влиять на результат расчета электромагнитной силы.

В ряде проведённых расчетов рассматривались значения плотности тока $J = 5,6 \dots 15,0 \text{ А/мм}^2$, при этом магнитодвижущая сила (МДС) статора изменялась в диапазоне $F_k = 80 \dots 214 \text{ А}$. Зазоры между статором и ротором $\delta = 1 \text{ мм}$, а высота обмотки изменялась в пределах $h_{об} = 1,07 \dots 8,60 \text{ мм}$. Рассматривалась высота постоянных магнитов $h_M = 4 \dots 20 \text{ мм}$, при этом оптимальные значения силы были получены для $h_M = 9 \dots 18 \text{ мм}$.

Представляет интерес аппроксимация полученных расчетных зависимостей по методу наименьших квадратов. Пример аппроксимирующих зависимостей силы F от относительной ширины полюсного постоянного магнита b_{M1}/τ для $h_M = 18 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $\delta_1 = 10 \text{ мм}$, $I = 80 \text{ А}$, $h_{об} = 42,86/\tau$, $\tau = 15 \text{ мм}$ приведён на рис. 4. Рассматривались аппроксимации полиномами (многочленами) степеней 1, 2, 3, 4 и 5 соответственно по формулам (1) – (5):

Из рис. 4 видно, что начиная со степени полинома 2, отличие аппроксимирующих зависимостей друг от друга значительно меньше, чем их отклонение от расчетных значений, показанных черными точками. Коэффициенты полиномов и сумма квадратов отклонений для каждого из них приведены в табл. 1.

$$F = D0 + D1(b_{M1}/\tau); \tag{1}$$

$$F = D0 + D1(b_{M1}/\tau) + D2(b_{M1}/\tau)^2; \tag{2}$$

$$F = D0 + D1(b_{M1}/\tau) + D2(b_{M1}/\tau)^2 + D3(b_{M1}/\tau)^3; \tag{3}$$

$$F = D0 + D1(b_{M1}/\tau) + D2(b_{M1}/\tau)^2 + D3(b_{M1}/\tau)^3 + D4(b_{M1}/\tau)^4; \tag{4}$$

$$F = D0 + D1(b_{M1}/\tau) + D2(b_{M1}/\tau)^2 + D3(b_{M1}/\tau)^3 + D4(b_{M1}/\tau)^4 + D5(b_{M1}/\tau)^5. \tag{5}$$

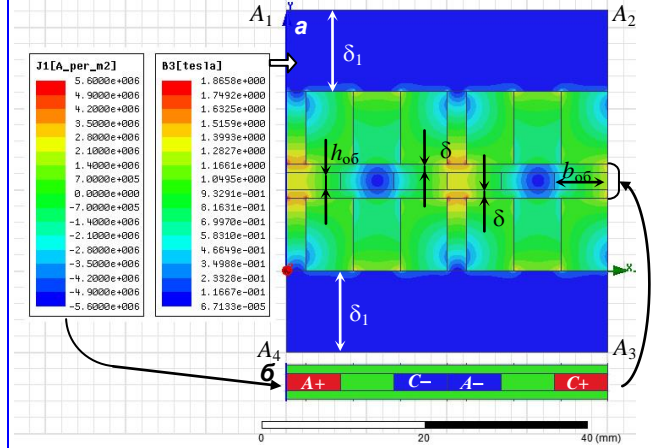


Рис. 3. Картина поля магнитной индукции электрического двигателя для привода воздушного винта (а) и заданное распределение плотности тока в обмотке якоря (б)

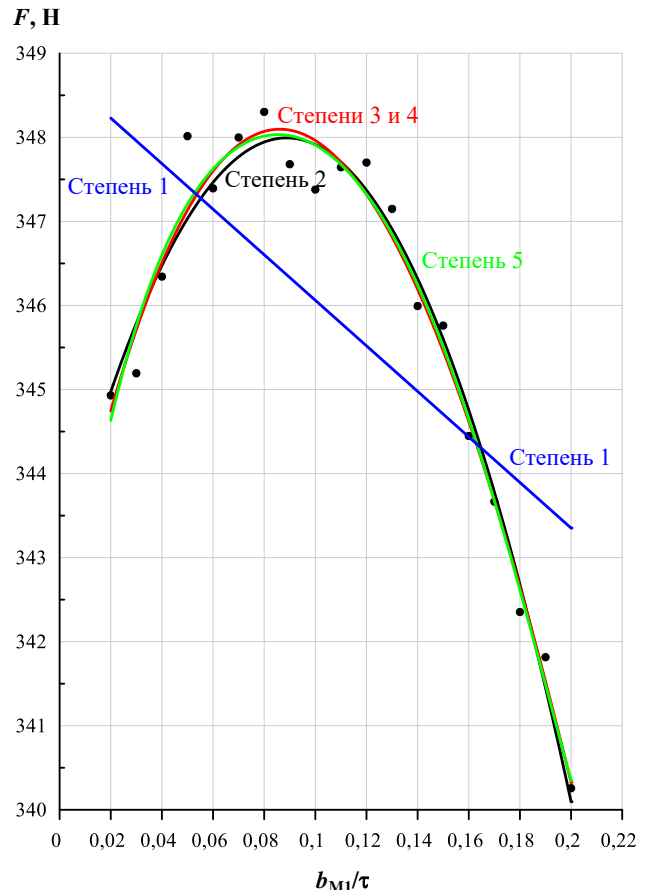


Рис. 4. Аппроксимирующие полиномы зависимости силы F от относительной ширины полюсного постоянного магнита b_{M1}/τ для $h_M = 18 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $\delta_1 = 10 \text{ мм}$, $I = 80 \text{ А}$, $h_{об} = 42,86/\tau$, $\tau = 15 \text{ мм}$

Из табл. 1 видно, что суммарная погрешность для найденных коэффициентов полиномов одного и того же порядка многочленов разной степени – одинакова. При этом увеличение степени полинома существенно усложняет дальнейший анализ, но приводит к слабому увеличению точности аппроксимации (как видно из рис. 5), поэтому аппроксимация полиномом степени 2 является оптимальной.

Примеры аппроксимации квадратичными полиномами вида (2) зависимостей силы F от относительной ширины постоянного магнита b_{M1}/τ для одного значения высоты постоянных магнитов и ряда значений полюсных делений $\tau = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40$ мм приведены на рис. 5. Следует отметить, что подробно рассмотренная аппроксимация зависимости, приведённая на рис. 4, представлена также на рис. 5 в виде квадратичного полинома (зелёная зависимость 2 при $\tau = 15$ мм).

Формула для $h_{об} = 42,86/\tau$ дает возможность поддерживать один и тот же ток при заданной плотности тока в рамках одного шага анализа при $h_M = \text{const}$. Поэтому при расчетах высота обмотки при этом шаге изменялась в пределах $h_{об} = 1,07 - 8,60$ мм.

Расчетные коэффициенты аппроксимирующих полиномов $D0, D1, D2$ приведены в табл. 2. Для каждого из полученных полиномов $F(b_{M1}/\tau)$ был найден максимум, соответствующий τ . Для каждого из полученных полиномов $F(b_{M1}/\tau)$ был найден максимум по формуле (6), соответствующий конкретному значению τ :

$$\left(\frac{b_{M1}}{\tau}\right)_{\max} = -\frac{D1}{2D2}. \quad (6)$$

Следует отметить, что формула (6) получена из условия равенства нулю производной от силы, полученной по формуле (2), по b_{M1}/τ .

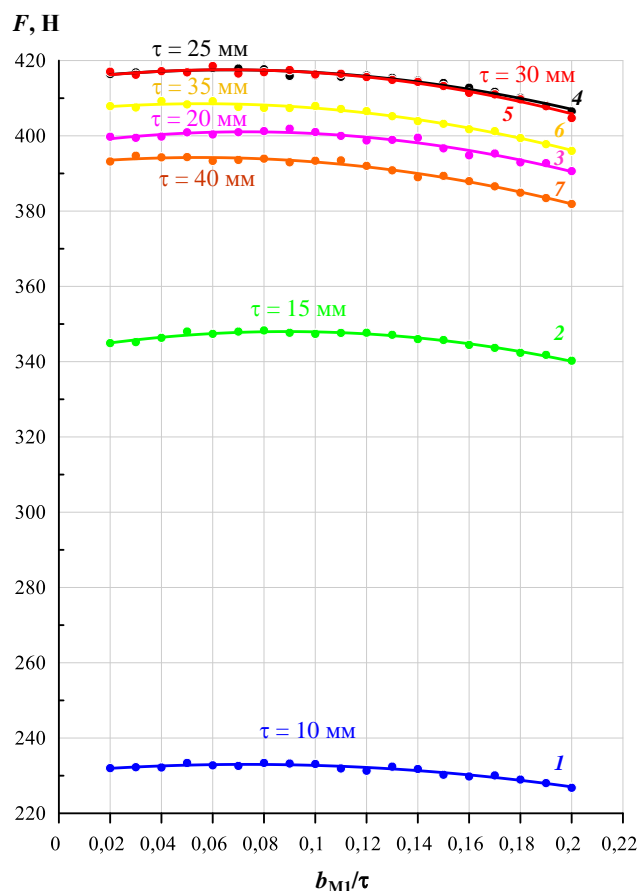


Рис. 5. Зависимость силы F от относительной ширины постоянного магнита b_{M1}/τ для $h_M = 18$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $\delta_1 = 10$ мм, $I = 80$ А, $h_{об} = 42,86/\tau$

Таблица 1

Коэффициенты аппроксимирующих полиномов расчетных точек зависимости $F(b_{M1}/\tau)$ для $h_M = 18$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $\delta_1 = 10$ мм, $I = 80$ А, $\tau = 15$ мм

Степень полинома		$D0$	$D1$	$D2$	$D3$	$D4$	$D5$
1	Значение коэффициента	348,7711	-27,0963	-	-	-	-
	Суммарная погрешность	99,7274	57,8773	-	-	-	-
2	Значение коэффициента	342,9611	113,3650	-638,4606	-	-	-
	Суммарная погрешность	99,7274	57,8773	2,5780	-	-	-
3	Значение коэффициента	342,2681	142,3520	-947,8304	937,4842	-	-
	Суммарная погрешность	99,7274	57,8773	2,5780	2,3082	-	-
4	Значение коэффициента	342,0060	158,0766	-1228,2447	2836,9248	-4316,9103	-
	Суммарная погрешность	99,7274	57,8773	2,5780	2,3082	2,2957	-
5	Значение коэффициента	341,1697	223,1460	-2891,8667	21 211,423	-95 225,220	165 287,84
	Суммарная погрешность	99,7274	57,8773	2,5780	2,3082	2,2957	2,2567

Таблица 2

Аппроксимирующие квадратичные полиномы $F(b_{M1}/\tau)$
 для $h_M = 18 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $I = 80 \text{ А}$, $\delta_1 = 10 \text{ мм}$, $h_{об} = 42,86/\tau$

τ , мм	Цвет	D0	D1	D2	$(b_{M1}/\tau)_{\max}$	Примечание
10	1 – синий	231,0101	54,2903	-370,7612	0,073	
15	2 – зелёный	342,9611	113,3650	-638,4606	0,089	
20	3 – розовый	397,5649	95,7970	-655,6145	0,073	
25	4 – черный	414,9801	76,9656	-583,0259	0,066	F_{\max}
30	5 – красный	414,7819	84,7182	-646,5439	0,066	
35	6 – желтый	406,6841	66,2694	-594,4814	0,055	
40	7 – оранжевый	392,4959	63,8538	-583,8520	0,055	

По формуле (6) построены зависимости наилучших значений силы $F(\tau)$. Эти зависимости представлены на рис. 6. В примечаниях к табл. 2 также указан глобальный максимум силы F_{\max} для каждой рассмотренной высоты постоянного магнита h_M (каждого шага анализа).

Результаты. При выборе оптимального значения $b_{M1}/\tau = 0,066$ для близкого к оптимальному значения $\tau = 25 \text{ мм}$ максимальная сила отличается от часто применяемого в сборке Хальбаха $b_{M1}/\tau = 0,25$ [1] всего лишь на 5%. При выборе оптимального значения $b_{M1}/\tau = 0,071$ для неоптимального $\tau = 10 \text{ мм}$ максимальная сила меньше максимальной силы для близкого к оптимальному значения $\tau = 25 \text{ мм}$ на 65%. Таким образом, более важным является выбор оптимально полюсного деления τ , чем ширины постоянных магнитов b_{M1} , b_{M2} , b_{M3} .

Наиболее оптимальным является полюсное деление в диапазоне $\tau = 20 \dots 30 \text{ мм}$, при этом относительная ширина постоянного магнита $b_{M1}/\tau = 0,062 \dots 0,073$ мм, а ширины остальных постоянных магнитов в сборке Хальбаха определяются выражением $b_{M2} = b_{M3} = (\tau - b_{M1})/3$. Область оптимальных значений $b_{M1}/\tau(\tau)$ заштрихована на рис. 6. Уменьшение размера b_{M1}/τ до значений менее 0,062 и увеличение более 0,073 приводит к снижению максимальной индукции в воздушном зазоре из-за увеличения потоков рассеяния между полюсами и снижению тангенциальной электромагнитной силы.

В итоге, для достижения максимальной тангенциальной электромагнитной силы ЭДВВ наиболее оптимальным является полюсные деления в диапазоне $\tau = 20 \dots 30 \text{ мм}$, при этом относительная ширина постоянного магнита $b_{M1}/\tau = 0,062 \dots 0,073$ мм, а ширины остальных постоянных магнитов определяются выражением $b_{M2} = b_{M3} = (\tau - b_{M1})/3$, оптимальные значения были получены для высот постоянных магнитов $h_M = 9 \dots 18 \text{ мм}$. Результаты найдены для плотности тока $J = 5,6 \dots 15,0 \text{ А/мм}^2$,

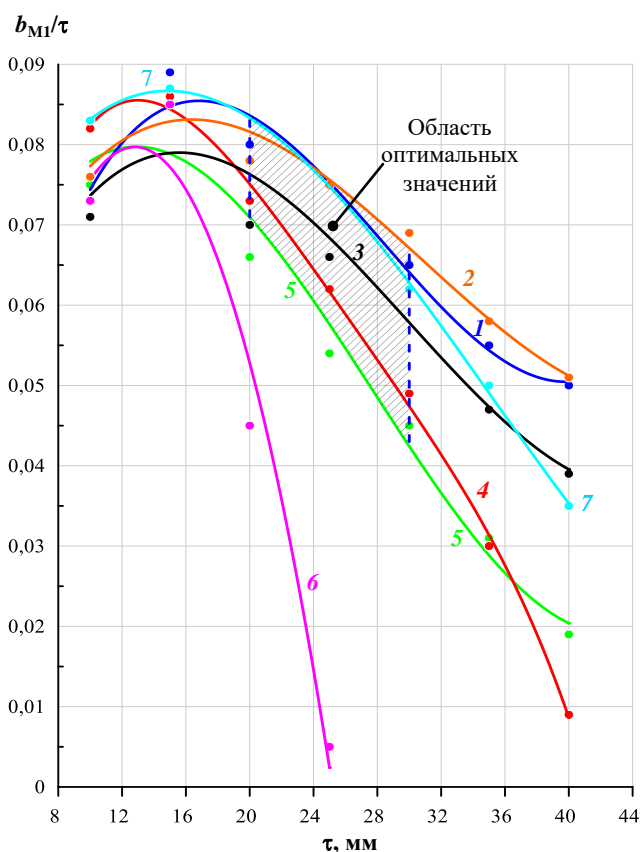


Рис. 6. Зависимости относительной ширины постоянного магнита b_{M1}/τ , вектор намагниченности которого перпендикулярен воздушному зазору, от величины полюсного деления τ : 1 – $h_M = 18 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $I = 80 \text{ А}$, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28 \text{ мм}$, $\tau_{\text{опт}} = 25 \text{ мм}$, $b_{M1}/\tau = 0,066$; 2 – $h_M = 13,5 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $I = 160 \text{ А}$, $h_{об} = 2,14 \dots 8,57 \text{ мм}$, $\tau_{\text{опт}} = 30 \text{ мм}$, $b_{M1}/\tau = 0,069$; 3 – $h_M = 13,5 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $I = 80 \text{ А}$, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28 \text{ мм}$, $\tau_{\text{опт}} = 25 \text{ мм}$, $b_{M1}/\tau = 0,066$; 4 – $h_M = 9 \text{ мм}$, $J = 11,2 \text{ А/мм}^2$, $I = 160 \text{ А}$, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28 \text{ мм}$, $\tau_{\text{опт}} = 20 \text{ мм}$, $b_{M1}/\tau = 0,073$; 5 – $h_M = 9 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $I = 80 \text{ А}$, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28 \text{ мм}$, $\tau_{\text{опт}} = 20 \text{ мм}$, $b_{M1}/\tau = 0,066$; 6 – $h_M = 4,5 \text{ мм}$, $J = 5,6 \text{ А/мм}^2$, $I = 80 \text{ А}$, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28 \text{ мм}$, $\tau_{\text{опт}} = 15 \text{ мм}$, $b_{M1}/\tau = 0,085$; 7 – $h_M = 13,5 \text{ мм}$, $J = 15 \text{ А/мм}^2$, $I = 214 \text{ А}$, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28 \text{ мм}$, $\tau_{\text{опт}} = 30 \text{ мм}$, $b_{M1}/\tau = 0,062$

при этом МДС катушки обмотки статора изменялась в диапазоне $F_k = 80 \dots 214$ А. Зазоры между статором и ротором $\delta = 1$ мм, а высота обмотки изменялась в пределах $h_{об} = 1,07 \dots 8,60$ мм. При этом рассматривалась высота постоянных магнитов в диапазоне $h_M = 4 \dots 20$ мм. Обмотка трехфазная $m = 3$, число пазов на полюс и фазу обмотки $q = 1$. Эти результаты получены впервые и защищены патентом на изобретение [3].

Вывод

Для достижения максимальной тангенциальной электромагнитной силы ЭДВВ наиболее оптимальным является полюсное деление в диапазоне

$\tau = 20 \dots 30$ мм, при этом относительная ширина постоянного магнита $b_{M1}/\tau = 0,062 \dots 0,073$ мм, а ширины остальных постоянных магнитов определяются выражением $b_{M2} = b_{M3} = (\tau - b_{M1})/3$, оптимальные значения были получены для высот постоянных магнитов $h_M = 9 \dots 18$ мм. Результаты получены для плотности тока $J = 5,6 \dots 15,0$ А/мм², при этом МДС катушки обмотки статора изменялась в диапазоне $F_k = 80 \dots 214$ А. Зазоры между статором и ротором $\delta = 1$ мм, а высота обмотки изменялась в пределах $h_{об} = 1,07 \dots 8,60$ мм, обмотка трехфазная $m = 3$, число пазов на полюс и фазу обмотки $q = 1$. При этом рассматривалась высота постоянных магнитов в диапазоне $h_M = 4 \dots 20$ мм.

Список источников

1. Патент на изобретение № 2829315 Российская Федерация, 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.
2. Захаренко А. Б., Тепляков И. А. Выбор оптимальной величины полюсного деления и ширины аксиально намагниченного постоянного магнита торцевой синхронной электромашин по критерию максимальной силы // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 3–8.
3. Патент на изобретение № 2846057 Российская Федерация, МПК H02K 21/12 (2006.01), H02K 1/27 (2006.01). Магнитоэлектрическая машина : № 2025108064 : заявл. 02.04.2025 : опубл. 29.08.2025 / И. Ю. Тепляков, А. Б. Захаренко. Бюл. № 25. 13 с.

References

1. 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.
2. Zakharenko A. B., Teplyakov I. A. Selection of the optimal value of pole width and axially magnetized permanent magnet width of the disk synchronous electric machine according to the criterion of maximum force // Electromechanical matters. VNIIEM studies. 2025. Vol. 208. № 5. Pp. 3–8.
3. Patent for invention No. 2846057 Russian Federation, IPC H02K 21/12 (2006.01), H02K 1/27 (2006.01). Magnetoelectric machine : No. 2025108064 : appl. 02.04.2025 : publ. 29.08.2025 / I. A. Teplyakov, A. B. Zakharenko. Bull. No. 25. 13 p.

Поступила в редакцию 02.09.2025

The article was submitted 02.09.2025

Информация об авторах

Иван Алексеевич Тепляков – аспирант, инженер-технолог 1 категории, т. 8 (495) 365-54-38, e-mail: otdel117@hq.vniiem.ru;

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

Information about the authors

Ivan Alekseevich Teplyakov – Postgraduate Student, Process Engineer of the 1st category, t. 8 (495) 365-54-38, e-mail: otdel117@hq.vniiem.ru;

Andrey Borisovich Zakharenko – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Department, t. 8 (495) 366-26-44, e-mail: otdel18@mcc.vniiem.ru.