

УДК 621.313

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

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

А. Б. ЗАХАРЕНКО, И. А. ТЕПЛЯКОВ
АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва
A. B. Zakharenko, I. A. Teplakov
JSC "VNIIEEM Corporation", Moscow

Аннотация. В малых летательных аппаратах широко применяются электрические двигатели для привода воздушного винта. Распространение получили электрические двигатели для привода воздушного винта с возбуждением от радиально намагниченных постоянных магнитов. Однако торцевые (дисковые) электрические двигатели для привода воздушного винта (электрические двигатели для привода воздушного винта с аксиальной намагниченностью или возбуждением от постоянных магнитов, собранных по схеме Хальбаха) имеют ряд преимуществ. Важной задачей является максимизация тангенциальной электромагнитной силы, действующей на два полюса электрических двигателей для привода воздушного винта, которая решена в двумерной постановке методом конечных элементов. Особенностью решенной задачи является варьирование ширины аксиально намагниченного постоянного магнита при одинаковой ширине трех других постоянных магнитов, составляющих полюсное деление по схеме Хальбаха. Задача решалась при варьировании высоты постоянных магнитов и величины полюсного деления. При этом поддерживалась постоянная величина и плотность тока. В результате проведенных расчетов получен ряд зависимостей относительной ширины аксиально намагниченного постоянного магнита b_m/τ от величины полюсного деления τ . Получена также область оптимальных значений b_m/τ в зависимости от τ .

Ключевые слова: электрический двигатель привода воздушного винта, постоянные магниты, схема намагничивания Хальбаха, торцевое (дисковое) исполнение.

Для цитирования: Захаренко А. Б., Тепляков И. А. Выбор оптимальной величины полюсного деления и ширины аксиально намагниченного постоянного магнита торцевой синхронной электромашины по критерию максимальной силы // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2025. Т. 208. № 5. С. 3–8.

Annotation. Electric propeller drive motors are widely used in small aircraft. Electric propeller drive motors with excitation from radially magnetized permanent magnets are widely used. However, end (disk) electric propeller drive motors (electric propeller drive motors with axial magnetization or excitation from permanent magnets assembled according to the Halbach scheme) have a number of advantages. An important task is to maximize the tangential electromagnetic force acting on two poles of electric propeller drive motors, which is solved in a two-dimensional formulation using the finite element method. A feature of the solved problem is varying the width of the axially magnetized permanent magnet with the same width of the other three permanent magnets constituting the pole division according to the Halbach scheme. The problem was solved by varying the height of the permanent magnets and the pole division value. In this case, a constant current value and density were maintained. As a result of the calculations, a number of dependencies of the relative width of an axially magnetized permanent magnet b_m/τ on the value of the pole division τ were obtained. The region of optimal values of b_m/τ depending on τ was also obtained.

Key words: electric propeller drive motor, permanent magnets, Halbach magnetization scheme, disk design.

For citation: Zakharenko A. B., Teplakov 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. VNIIEEM studies. 2025. Vol. 208. № 5. P. 3–8.

В малых летательных аппаратах широко применяются электрические двигатели для привода воздушного винта. Распространение получили электрические двигатели для привода воздушного винта (ЭДВВ) с радиальной намагниченностью постоянных магнитов. Однако торцевые (дисковые) ЭДВВ имеют ряд преимуществ. Для возбуждения ЭДВВ часто применяются постоянные магниты, намагниченные по схеме Хальбаха, при этом ширина всех постоянных магнитов в сборке Хальбаха, как правило, одинакова. Ранее было получено [1],

что если ширина аксиально намагниченного постоянного магнита в сборке Хальбаха 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 ЭДВВ, при варьировании:

- ширины аксиально намагниченного постоянного магнита, отнесённой к полюсному делению;
- полюсного деления.

Наиболее точно дисковые машины могут быть рассчитаны методами компьютерного моделирования только в трехмерной постановке. Это связано с трехмерными (3D) эффектами: эффектом кривизны и краевым эффектом. Эффект кривизны – это зависимость распределения магнитного потока от геометрии полюсного деления вдоль радиуса дисковой ЭДВВ. Краевой эффект – это искажение магнитного потока, которое возникает на внутреннем и внешнем радиусах дисковой ЭДВВ. Несмотря на высокую точность, получаемую с помощью трехмерного анализа методом конечных элементов, 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 данной работе не используется.

Расчетная модель. В связи с вышеупомянутыми трудностями трехмерного расчета часто проводят моделирование дискового ЭДВВ в двухмерной (2D) постановке. 2D-моделирование выполняется на среднем диаметре статора и ротора, что эквивалентно модели линейной машины с постоянными магнитами. Принцип преобразования трехмерной геометрии дисковой электрической машины в двухмерную представлен на рис. 1: в трехмерной модели приведена цилиндрическая поверхность 1 среднего диаметра, в двухмерной модели развернутая плоскость 2 получается из цилиндрической поверхности 1. 2D-вычисления методом конечных элементов используют развернутую плоскость 2, которая рассматривается в декартовых координатах и может быть использована в большинстве программных пакетов. Это позволяет повысить скорость расчетов в современных программных пакетах конечно-элементного компьютерного моделирования таких, как *Ansys Maxwell*, и проводить расчеты дисковых ЭДВВ в 2D-постановке без существенного снижения точности по сравнению с 3D-постановкой. С учетом симметрии 2D-развертки расчетная модель может быть получена с учетом двух полюсных делений (на два полюса).

Фрагмент активной части торцевого ЭДВВ, развернутого в 2D с учетом двух полюсных делений, представлен на рис. 2. Заданы следующие материалы элементов магнитной системы: постоянные магниты 1 – неодим-железо-бор NdFeB, марки N40UH (коэрцитивная сила $H_c = 900$ кА/м), материал катушек обмотки 2 – медь, в зазорах между статором и ротором – воздух, для ярем 3 выбран немагнитный непроводящий материал, аналогичный воздуху в окружающем пространстве. Стрелками на рис. 2 показаны направления намагниченности постоянных магнитов.

На рис. 3 рассмотрен случай, когда направление тока в обмотке согласовано с положением ротора. В катушках фаз А и С задана плотность тока $J = 15 \cdot 10^6$ А/м², в катушках фазы В плотность тока $J = 0$ (отмечена зеленым цветом). Этот режим практически соответствует максимальной силе, действующей параллельно оси x . На рис. 2 обозначены: h_M – высота постоянного магнита; τ – полюсное деление; b_{M1} , b_{M2} , b_{M3} – ширина аксиально, тангенциально и специально намагниченных постоянных магнитов.

При расчетах варьировались: b_{M1} – ширина аксиально намагниченного магнита; τ – полюсное деление, при этом $b_{M2} = b_{M3} = (\tau - b_{M1})/3$.

Каждый расчет проводится для определённого значения высоты постоянного магнита. При расчетах были приняты значения плотности тока $J = 5,6 \dots 15,0$ А/мм², необходимые для обеспечения охлаждения ЭДВВ воздушным винтом. Результатом расчета являлась электромагнитная сила в направлении оси x . Её значение рассчитано для эквивалентного линейного двигателя, имеющего глубину 1 м в направлении оси z (перпендикулярному рассматриваемой плоскости xy).

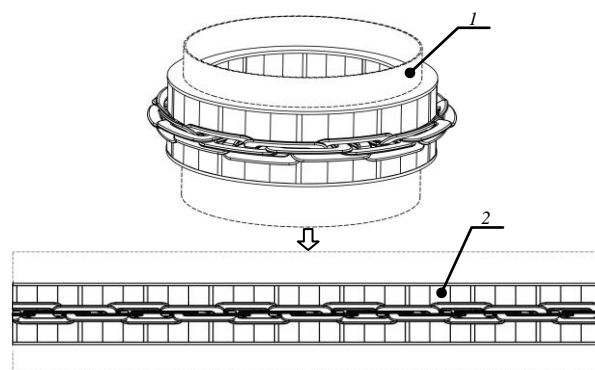


Рис. 1. Принцип преобразования трехмерной (1) геометрии дискового электрического двигателя для привода воздушного винта в двухмерную (2)

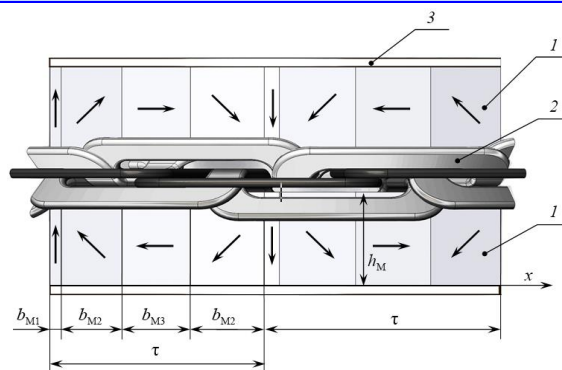


Рис. 2. Двухполюсная 2D-развертка активной части торцевого (дискового) электрического двигателя для привода воздушного винта: 1 – постоянные магниты ротора; 2 – обмотка статора; 3 – ярмо ротора

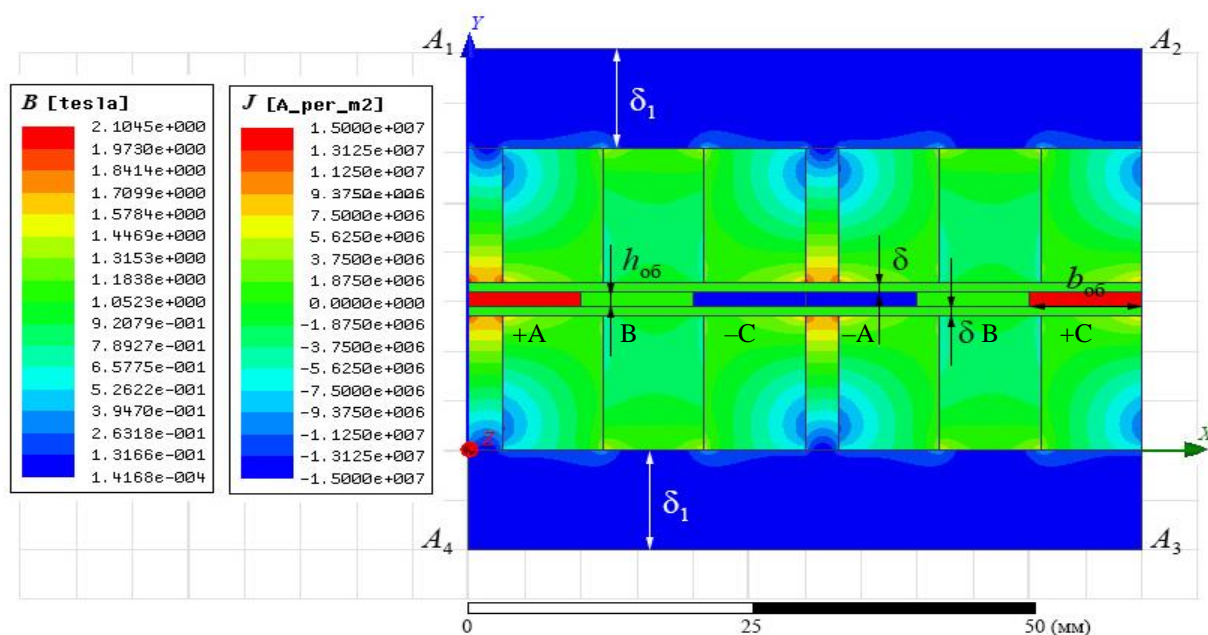


Рис. 3. Картина поля распределения плотности тока в обмотке якоря и магнитной индукции электрического двигателя для привода воздушного винта

При построении расчетной модели магнитного поля (см. рис. 3) установлены граничные условия: 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. +A, +C – начала соответствующих фаз, –A, –C – их концы, ток в фазе B равен нулю. 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 проведенных расчетов рассматривались значения плотности тока $J = 5,6 \dots 15,0$ А/мм², при этом магнитодвижущая сила (МДС) 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. Рассматривалась высота постоянных магнитов $h_M = 4 \dots 20$ мм, при этом оптимальные значения силы были получены для $h_M = 9 \dots 18$ мм.

Примеры зависимости силы F от относительной ширины аксиально намагниченного постоянного магнита b_M/τ для одного значения высоты постоянных магнитов и ряда значений полюсных делений $\tau = 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40$ мм приведены на рис. 4 и 5 соответственно. 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 $h_{об} = 1,07 \dots 8,60$ мм.

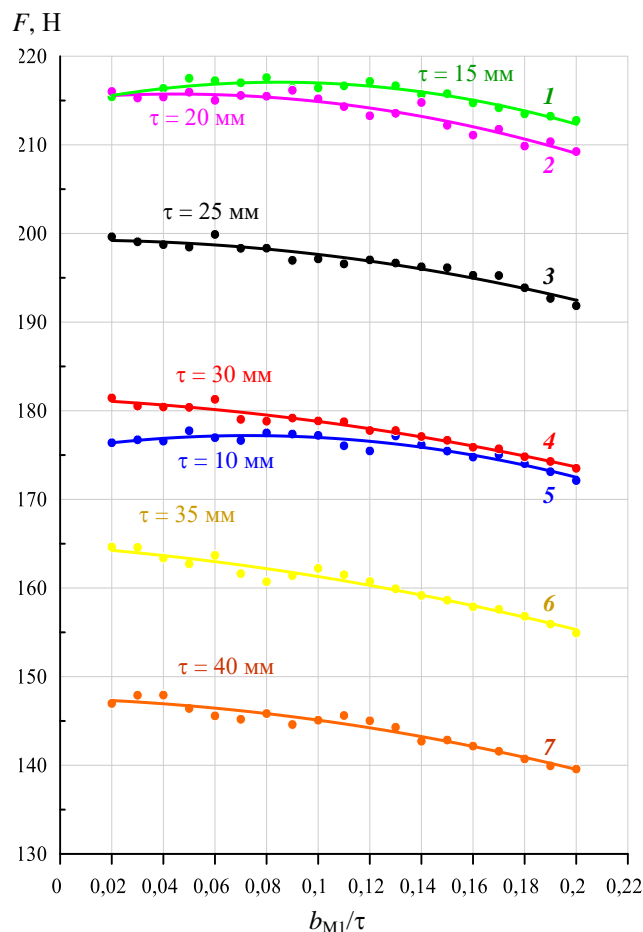


Рис. 4. Зависимость силы F от относительной ширины аксиально намагниченного постоянного магнита b_M/τ для $h_M = 4,5$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $I = 80$ А, $\delta_1 = 10$ мм, $h_{об} = 42,86/\tau$

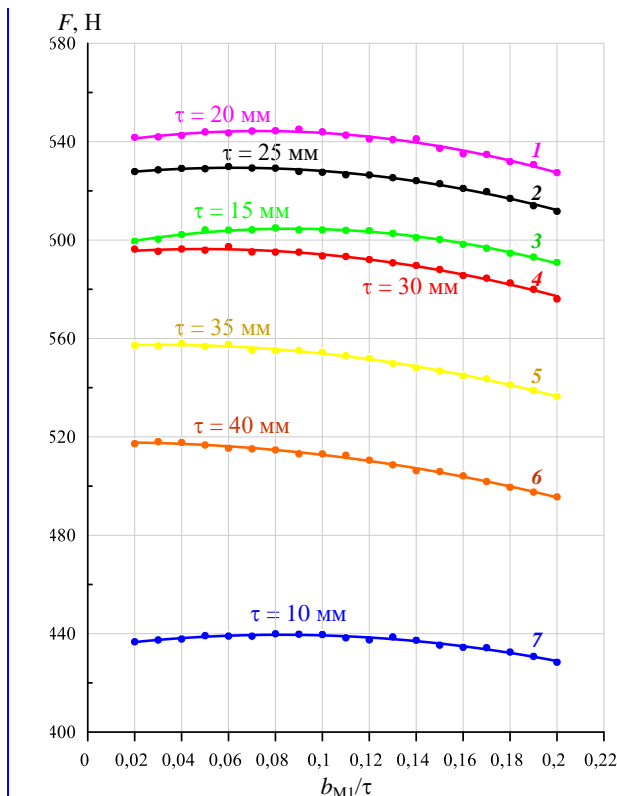


Рис. 5. Зависимость силы F от относительной ширины аксиально намагниченного постоянного магнита b_{M1}/τ для $h_M = 9$ мм, $J = 11,2$ А/мм², $I = 160$ А, $\delta_1 = 10$ мм, $h_{об} = 42,86/\tau$

Каждая из полученных кривых F , в зависимости от b_{M1}/τ (см. рис. 4 и 5), аппроксимирована по методу наименьших квадратов [2] квадратичным полиномом вида:

$$F(b_{M1}/\tau) = D0 + D1(b_{M1}/\tau) + D2(b_{M1}/\tau)^2. \quad (1)$$

Примеры коэффициентов ($D0$, $D1$, $D2$) аппроксимирующих полиномов приведены в табл. 1, 2, каждый из которых соответствует одному шагу анализа (одной высоте постоянного магнита, одной плотности тока и току). Для каждого из полученных полиномов $F(b_{M1}/\tau)$ был найден максимум по формуле (2), соответствующий конкретному значению τ (см. табл. 1 и 2):

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

Формула (2) найдена из условия равенства нулю производной от силы, полученной по формуле (1), по b_{M1}/τ . По формуле (2) построены зависимости наилучших значений силы $F(\tau)$. Эти зависимости представлены на рис. 6: 1 (синий) – $h_M = 18$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $I = 80$ А, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28$ мм, $\tau_{опт} = 25$ мм, $b_{M1}/\tau = 0,066$; 2 (оранжевый) – $h_M = 13,5$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $I = 160$ А, $h_{об} = 2,14 \dots 8,57$ мм, $\tau_{опт} = 30$ мм, $b_{M1}/\tau = 0,069$; 3 (черный) – $h_M = 13,5$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $I = 80$ А, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28$ мм, $\tau_{опт} = 25$ мм, $b_{M1}/\tau = 0,066$; 4 (красный) – $h_M = 9$ мм, $J = 11,2$ А/мм², $I = 160$ А, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28$ мм, $\tau_{опт} = 20$ мм, $b_{M1}/\tau = 0,073$; 5 (зеленый) – $h_M = 9$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $I = 80$ А, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28$ мм, $\tau_{опт} = 20$ мм, $b_{M1}/\tau = 0,066$; 6 (розовый) – $h_M = 4,5$ мм, $J = 5,6$ А/мм², $I = 80$ А, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28$ мм, $\tau_{опт} = 15$ мм, $b_{M1}/\tau = 0,085$; 7 (голубой) – $h_M = 13,5$ мм, $J = 15$ А/мм², $I = 214$ А, $h_{об} = 1,07 \dots 4,28$ мм, $\tau_{опт} = 30$ мм, $b_{M1}/\tau = 0,062$. В примечаниях к табл. 1, 2 также указан глобальный максимум силы F_{\max} для каждой рассмотренной высоты постоянного магнита h_M (каждого шага анализа).

Таблица 1

Аппроксимирующие полиномы $F(b_{M1}/\tau)$ для $h_M = 4,5$ мм, $J = 5,6$ А/мм ² , $I = 80$ А, $\delta_1 = 10$ мм, $h_{об} = 42,86/\tau$ (см. рис. 4)						
τ , мм	Цвет	$D0$	$D1$	$D2$	$(b_{M1}/\tau)_{\max}$	Примечания
10	5 (синий)	175,6487	42,4866	-291,2691	0,073	
15	1 (зелёный)	214,4981	60,53692	-356,8519	0,085	F_{\max}
20	2 (розовый)	215,1720	24,8886	-277,8258	0,045	
25	3 (черный)	199,2479	1,6004	-177,3322	0,005	
30	4 (красный)	181,3712	-12,9780	-127,8755	-0,051	
35	6 (жёлтый)	164,7337	-21,6690	-127,3148	-0,085	
40	7 (оранжевый)	147,5506	-9,06122	-155,0963	-0,029	

Таблица 2

Аппроксимирующие полиномы $F(b_{M1}/\tau)$ для $h_M = 9$ мм, $J = 11,2$ А/мм ² , $I = 160$ А, $\delta_1 = 10$ мм, $h_{об} = 42,86/\tau$ (см. рис. 5)						
τ , мм	Цвет	$D0$	$D1$	$D2$	$(b_{M1}/\tau)_{\max}$	Примечания
10	7 (синий)	434,3808	125,9425	-767,1736	0,082	
15	3 (зелёный)	596,3508	190,7157	-1099,9354	0,086	
20	1 (розовый)	638,6293	154,9192	-1054,9153	0,073	F_{\max}
25	2 (черный)	625,9282	112,0455	-903,4772	0,062	
30	4 (красный)	594,3625	81,7325	-837,8466	0,049	
35	5 (жёлтый)	556,7395	44,4253	-729,9339	0,030	
40	6 (оранжевый)	517,7090	11,1556	-612,9817	0,009	

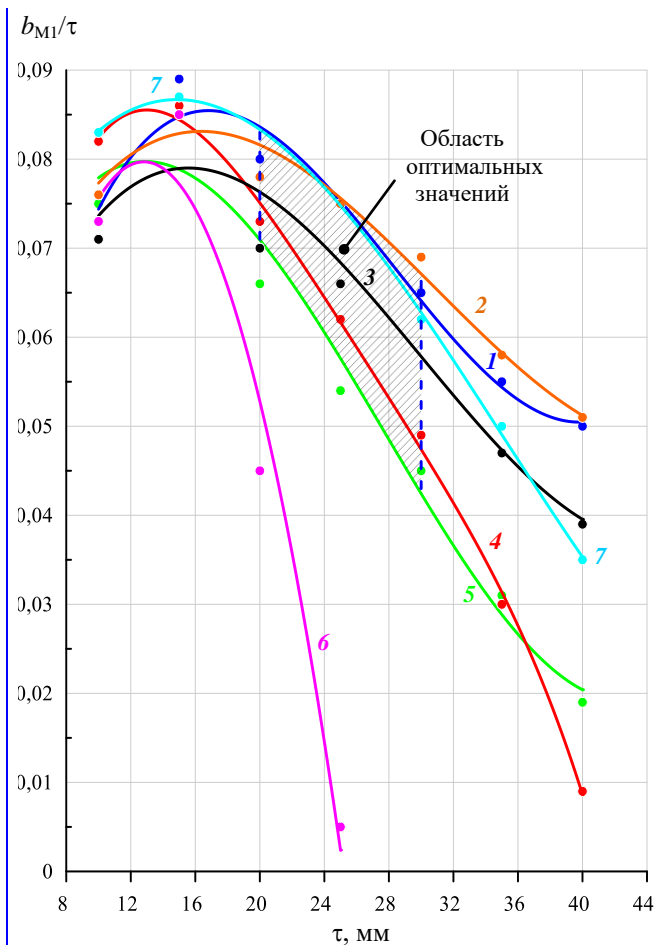


Рис. 6. Зависимости относительной ширины аксиально намагниченного постоянного магнита b_{M1}/τ от величины полюсного деления τ

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

Наиболее оптимальным является полюсное деление в диапазоне $\tau = 20 \dots 30$ мм, при этом относительная ширина аксиально намагниченного постоянного магнита находится в диапазоне $b_{M1}/\tau = 0,062 \dots 0,073$ 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.

Следует отметить, что оптимальные значения были получены для высот постоянных магнитов $h_M = 9 \dots 18$ мм. Результаты найдены для плотности тока $J = 5,6 \dots 15,0$ А/мм², при этом магнитодвижущая сила 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. Расчеты проводились для высоты 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 торцевого исполнения необходимо выбирать полюсные деления в диапазоне $\tau = 20 \dots 30$ мм, при этом относительная ширина аксиально намагниченного постоянного магнита находится в диапазоне $b_{M1}/\tau = 0,062 \dots 0,073$ 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. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры: учебник для вузов. М. : Физматлит, 2009. 309 с.
3. Патент на изобретение № 2846055 Российская Федерация. Торцевая магнитоэлектрическая машина : № 2025108063 : опубл.: 29.08.2025 / И. А. 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. Beklemishev D. V. Course of analytical geometry and linear algebra: textbook for universities. M. : Fizmatlit, 2009. 309 p.
3. Patent for invention No. 2846055 Russian Federation. Disk magnetoelectric machine : No. 2025108063 : 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

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

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

Information about the authors

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

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