

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621:313

Ю. Сан,
А. П. Сеньков

СРАВНЕНИЕ МАССОГАБАРИТНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЕНТИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ И ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКАМИ СТАТОРА

В статье выполнено сравнение по массе и габаритам двух видов вентильных электродвигателей с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ), отличающихся конструкцией статора: с распределенной обмоткой статора и с зубцовым шагом обмотки статора. Показано, что в машинах с зубцовым шагом обмотки статора при заданном диаметре расточки статора число пар полюсов ротора может быть значительно больше, чем в машинах с распределенной обмоткой статора. Вследствие этого в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора магнитный поток полюса и необходимая ширина ярма магнитопровода статора и ротора уменьшаются. В результате расчета установлено, что масса и габариты магнитопровода статора и ротора в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки оказываются меньше. Кроме того, катушки ВДПМ с зубцовым шагом обмотки имеют длину лобовых частей меньше, чем катушки ВДПМ с распределенной обмоткой статора, что также снижает массу и габариты обмотки статора.

Ключевые слова: вентильный электродвигатель, постоянные магниты, габариты и масса, зубцовые обмотки, распределенные обмотки статора.

Введение

Вентильные электродвигатели с постоянными магнитами на роторе (ВДПМ), имеющие высокий КПД, минимальные массу и габариты, нашли широкое применение в самых разнообразных управляемых электроприводах: от приборных электроприводов мощностью в доли ватта до судовых гребных электрических установках с выходной мощностью в несколько мегаватт. По конструкции ротора различают ВДПМ с цилиндрическим ротором, которые применяются чаще, и ВДПМ с дисковым ротором. По конструкции статора различают ВДПМ с двухслойной распределенной обмоткой статора, машины с зубцовым шагом, описанные в публикации [1, с. 9], и машины с поперечным магнитным потоком, конструкция которых приведена в источниках [2], [3].

Машины с поперечным магнитным потоком находятся на стадии исследования и пока не применяются. ВДПМ с распределенной обмоткой статора известны с 60-х гг. XX в. и широко применяются в электроприводах [4]. ВДПМ с зубцовым шагом появились примерно двадцать лет назад, согласно данным источников [5], [6], но в ряде электроприводов они предпочтительнее, чем машины с распределенной обмоткой статора. В зарубежных публикациях ВДПМ с зубцовым шагом называют «with non-overlapping concentrated windings» (с неперекрывающимися сосредоточенными обмотками) [7]. Как и ВДПМ с распределенной обмоткой статора, ВДПМ с зубцовым шагом позволяют получить высокий обмоточный коэффициент и хорошую форму электродвижущей силы в фазах, от которой зависит КПД машины. В публикации [7] значения обмоточного коэффициента различных конструктивных вариантов ВДПМ с зубцовым шагом определены с помощью векторных диаграмм, а в источниках [8], [9] аналогичные значения обмоточного коэффициента получены аналитическим способом.

Основная часть

Основное различие двух видов ВДПМ проявляется в массогабаритных характеристиках, которые зависят от числа пар полюсов магнитного поля ротора и числа пазов (зубцов) на полюс и

фазу q . В ВДПМ с распределенной обмоткой статора $q \geq 1$, при этом разработчики машин стараются обеспечить q до нескольких единиц, поскольку с увеличением q возрастает обмоточный коэффициент и форма ЭДС в фазах получается более близкой к синусоиде. Ширина τ полюса ротора равна $\tau = tqm$, где t — ширина зубцового деления магнитопровода статора; m — число фаз статора. Во время работы машины на зубцы магнитопровода статора действуют радиальные и тангенциальные силы, которые зубцы статора должны выдерживать без существенных деформаций. Минимальная ширина зубцов статора, обеспечивающих механическую прочность, равна 5 – 6 мм, а ширина зубцового деления магнитопровода t примерно в два раза больше. Тогда при $m = 3$ и $q = 1$ минимальная ширина полюса $\tau = 30$ мм. Такое ограничение размеров ширины τ обусловлено конструкцией статора с распределенной обмоткой, хотя можно выполнить ротор с намного меньшей шириной.

Конструкция статора ВДПМ с зубцовым шагом позволяет выполнить ротор со значительно большим числом полюсов ротора и меньшей шириной τ , поскольку в этих машинах ширина зубца статора и τ примерно равны. В машинах с зубцовым шагом, как показано в работе [5], число полюсов ротора $2p$ и число зубцов статора z должны находиться из соотношения $2p = \Theta(mz_{\text{гр}} \pm 1)$, где $\Theta = 1, 2, 3, \dots$ — число повторяющихся частей статора, в каждой из которых число катушечных групп равно числу фаз m ; $z_{\text{гр}} = 1, 2, 3$ — число катушек в катушечной группе.

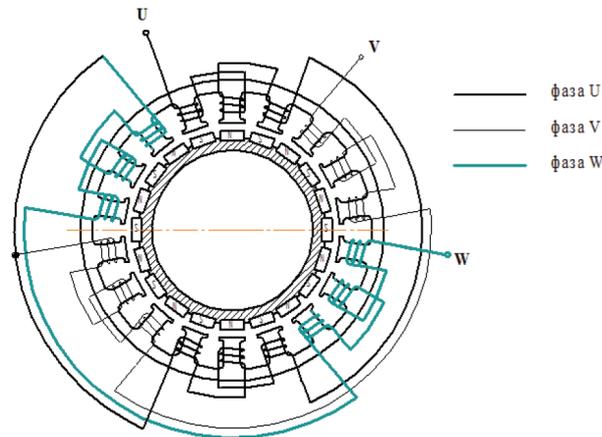


Схема ВДПМ

На рисунке приведена схема ВДПМ с зубцовым шагом, у которого $z = 18$, $\Theta = 2$, $z_{\text{гр}} = 3$, $p = 10$, $m = 3$ и $q = 0,3$. Статор состоит из двух повторяющихся частей, в каждой из которых содержится по девять зубцов. В трехфазной обмотке статора, соединенной «звездой», каждая фаза расположена на трех соседних зубцах магнитопровода. Катушки фазы соединяются таким образом, чтобы полярность зубцов фазы чередовалась. Для сравнения габаритов и массы машин с разным исполнением статора выберем исходные параметры двигателя, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Исходные параметры для расчета габаритов и массы машины

Обозначение	Наименование	Величина	Единица измерения
P	Номинальная мощность на валу	1000	Вт
n	Номинальная частота вращения ротора	1000	об/мин
U	Номинальное линейное напряжение питания	105	В
m	Число фаз	3	
η	Номинальный КПД	0,9	

Таблица 1
 (Окончание)

$\cos \varphi$	Номинальный коэффициент мощности	0,95	
A	Линейная нагрузка	20000	А/м
B	Индукция в зазоре	0,75	Тл
j	Плотность тока в проводнике фазы	5	А/мм ²
α	Коэффициент полюсного перекрытия	0,75	
D	Диаметр расточки статора	80	мм
δ	Длина воздушного зазора между ротором и магнитопроводом статора	0,8	мм

Разумеется, что η , $\cos \varphi$, α значит, и допустимые A и j у машин разного исполнения будут отличаться, но это отличие будет небольшим и при сравнении машин им можно пренебречь. Диаметр ротора будем считать равным диаметру расточки статора, поскольку их разница, составляющая 0,5 – 1 мм, на оценку массы и габаритов машины практически не повлияет. Также не будет учитываться увеличение потоков рассеяния магнитного поля ротора при увеличении числа пар полюсов и изменение обмоточного коэффициента, который у машин с зубцовым шагом, согласно данным источников [7], [9], зависит от схемы обмотки статора. Выберем минимальное зубцовое деление магнитопровода статора $t_{z\min} = 10$ мм. Тогда минимальная ширина зубца $t_{z\min} = 0,55t_z = 5,5$ мм. Этой величины достаточно, чтобы выдержать действующие на зубцы тангенциальные силы. Ширина паза b составит $b = t_z - t_{z\min} = 4,5$ мм. Максимальное число зубцов магнитопровода статора при заданном $D = 80$ мм и выбранном $t_{z\min}$ будет $z_{\max} = \pi D / t_z = 25$.

При полученном числе z_{\max} трехфазный ($m = 3$) ВДПМ с распределенной обмоткой статора может быть выполнен в различных вариантах:

– первый вариант — число пар полюсов ротора $p = 1$, $m = 3$, $q = 4$, число зубцов магнитопровода статора $z = 24$;

– второй вариант — $p = 2$, $q = 3$, $z = 24$.

Методика оценки массы ВДПМ для различных вариантов поясняется на примере расчета первого варианта машины согласно выражениям (1) – (21).

Длина активной части ротора l у синхронных машин разного исполнения при принятых исходных данных будет равна, согласно данным источника [10, с. 506],

$$l = \frac{6,1S}{\alpha \kappa_B \kappa_{об} ABD^2 n} = 0,096 \text{ м}, \quad (1)$$

где $S = P / \eta \cdot \cos \varphi = 1170 \text{ В} \cdot \text{А}$ — полная мощность; $\kappa_B = 1,1$ — коэффициент формы поля; $\kappa_{об}$ — обмоточный коэффициент, зависящий от схемы обмотки статора, в выражении (1) принят равным для всех вариантов, $\kappa_{об} = 0,92$.

Число пар полюсов оказывает влияние на массу и габариты магнитопровода ротора и статора, число витков и массу меди обмотки статора. При $p = 1$ максимальный магнитный поток полюса ротора составит

$$\Phi_m = \frac{\pi D \alpha I B}{2p} = 0,0068 \text{ Вб}. \quad (2)$$

Ширина ярма статора b_c определяется допустимой индукцией $B_c = 1,6 \text{ Тл}$ в ярме:

$$b_c = \frac{\Phi_m}{2I B_c} = \frac{\pi D \alpha B}{4p B_c} = 0,02 \text{ м}. \quad (3)$$

В ярме ротора индукция магнитного поля знак не меняет, поэтому значение допустимой индукции в ярме ротора можно принять выше — $B_p = 2,0$ Тл. Отсюда ширина b_p ярма ротора составит

$$b_p = \frac{\Phi_m}{2lB_p} = \frac{\pi D \alpha B}{4pB_p} = 0,018 \text{ м.} \quad (4)$$

Фазное напряжение двигателя

$$U_\phi = \frac{U}{\sqrt{3}} = 60. \quad (5)$$

Ток фазы

$$I_\phi = \frac{S}{3U_\phi} = 6,5 \text{ А.} \quad (6)$$

Площадь поперечного сечения проводника фазы

$$S_{\text{пр}} = I_\phi / j = 1,3 \text{ мм}^2. \quad (7)$$

На номинальной частоте вращения фазное напряжение и фазная ЭДС примерно равны:

$$U_\phi \approx E_\phi = \frac{\kappa_B \kappa_{\text{об}} w_\phi \Phi_m p \omega}{\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Отсюда

$$w_\phi = \frac{\sqrt{2} U_\phi}{\kappa_B \kappa_{\text{об}} \Phi_m p \omega} = 114 \text{ витка.} \quad (9)$$

Число активных проводников фазы

$$N_\phi = 2w_\phi = 228. \quad (10)$$

Проводники каждой фазы располагаются в восьми пазах, при этом можно определить высоту паза следующим образом:

$$h_n = \frac{N_\phi S_{\text{пр}}}{8\kappa_m b} = 26 \text{ мм,} \quad (11)$$

где $\kappa_m = 0,3$ — коэффициент заполнения паза медью.

Теперь можно определить наружный диаметр магнитопровода статора,

$$D_n = D + 2h_n + 2b_c = 0,171 \text{ м.} \quad (12)$$

Масса ярма пакета магнитопровода статора составит

$$M_c = \gamma_c \kappa_c \frac{\pi}{4} l [D_n^2 - (D + 2h_n)^2] = 6,7 \text{ кг,} \quad (13)$$

где $\kappa_c = 0,95$ — коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью; $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$ — плотность стали.

Масса зубцов магнитопровода статора

$$M_3 = \gamma_c \kappa_c z l_3 h_n = 2,6 \text{ кг.} \quad (14)$$

Длина витка l_b обмотки статора примерно равна

$$l_b = 2l + 2 \cdot 1,3\pi D / 2p = 0,52 \text{ м,} \quad (15)$$

где длина лобовой части витка принята равной 1,3 ширины полюсного деления $\tau = \pi D / 2p$.

Масса меди статора

$$M_m = m \gamma_m S_{\text{пр}} w_\phi l_b = 1,9 \text{ кг,} \quad (16)$$

где $\gamma_m = 8300 \text{ кг/м}^3$ — плотность меди.

Общая масса статора составит

$$M_{ст} = M_c + M_3 + M_m = 11,2 \text{ кг.} \quad (17)$$

Выбираем для ротора схему ротора «звездочка» с радиальным направлением намагниченности постоянных магнитов. Для получения индукции в зазоре машины $B = 0,75$ Тл достаточная длина постоянных магнитов составляет $l_{ПМ} = 5$ мм, тогда масса постоянных магнитов составит

$$M_{ПМ} = \gamma_{ПМ} \alpha l \frac{\pi}{4} [(D - 2\delta)^2 - (D - 2\delta - 2l_{ПМ})^2] = 0,62 \text{ кг,} \quad (18)$$

где $\gamma_{ПМ} = 7500 \text{ кг/м}^3$ — плотность материала постоянных магнитов.

Масса втулки ротора

$$M_{БР} = \gamma_c l \frac{\pi}{4} [(D - 2\delta - 2l_{ПМ})^2 - (D - 2\delta - 2l_{ПМ} - 2b_p)^2] = 2,1 \text{ кг.} \quad (19)$$

Общая масса ротора будет равна

$$M_p = M_{ПМ} + M_{БР} = 2,72 \text{ кг;} \quad (20)$$

$$M = M_{см} + M_p = 13,9 \text{ кг.} \quad (21)$$

В табл. 2 приведены данные расчета габаритов и массы элементов ВДПМ разного исполнения, в том числе ВДПМ с зубцовыми обмотками статора при $q = 0,3$.

Таблица 2

Результаты расчета габаритов и массы нескольких вариантов исполнения машины

Параметр	Единица измерения	$p = 1, m = 3, q = 4, z = 24$	$p = 2, m = 3, q = 2, z = 24$	$p = 10, m = 3, q = 0,3, z = 18$
l	мм	96	96	96
Φ	Вб	0,0068	0,0034	0,0017
b_c	мм	20	9,8	5
b_p	мм	18	8,8	5
w_ϕ	-	114	114	114
$D_{н}$	мм	171	151	142
M_c	кг	6,7	3,1	1,53
M_3	кг	2,6	2,6	2,6
M_m	кг	1,9	1,3	0,82
$M_{см}$	кг	11,2	7,0	4,95
$M_{ПМ}$	кг	0,62	0,62	0,62
$M_{БР}$	кг	2,1	1,24	0,75
M_p	кг	2,72	1,86	1,37
M	кг	13,92	8,86	6,28

Примечание. В ВДПМ с зубцовыми обмотками ширина ярма магнитопровода статора b_c и ширина ярма ротора b_p при расчете по выражениям (3) и (4) получены менее 5 мм, но из условия механической прочности пакета статора и втулки ротора приняты равными 5 мм.

Обсуждение полученных результатов

Приведенный расчет, из-за ряда допущений, имеет приближенный характер, однако наглядно показывает, что машины с зубцовым шагом обмотки статора имеют преимущество по габаритам и массе за счет уменьшения магнитного потока полюса и соответствующего сокращения ширины ярма магнитопровода статора и ротора. Кроме того, в машинах с зубцовым шагом обмотки сокращается длина лобовых частей витков обмотки статора, что также уменьшает массу машины.

Выводы

1. Число полюсов ротора в ВДПМ с зубцовым шагом может быть существенно большим, чем в ВДПМ с распределенной обмоткой статора при одинаковом диаметре ротора.
2. ВДПМ с зубцовым шагом имеют меньшие габариты и массу за счет уменьшения ширины ярма магнитопровода статора и ротора, а также длины лобовых частей витков обмотки статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М. В. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями / М. В. Баранов [и др.]. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. — 240 с.
2. Chen A. Y. Performance comparisons among radial-flux, multistage axial-flux, and three-phase transverse-flux PM machines for downhole applications / A. Y. Chen, R. Nilssenand, A. Nysveen // Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International. — IEEE, 2009. — Pp. 1010–1017. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075328.
3. Калмыков А. Н. Вентильный электродвигатель с поперечным магнитным потоком и дисковым ротором / А. Н. Калмыков, А. А. Сеньков, А. П. Сеньков, // Электротехника. — 2016. — № 4. — С. 24–28.
4. Лебедев Н. И. Бесконтактные двигатели постоянного тока / Н. И. Лебедев, И. Е. Овчинников. — Л.: Наука (Ленинградское отд.), 1979. — 270 с.
5. Пат. 2047936 Российская Федерация, МПК H02K 21/00 (1995.01). Синхронный электродвигатель / В. Н. Бродовский, Е. С. Иванов, М. И. Лузин, В. П. Петухов, М. И. Пятков; заяв. Центральный научно-исследовательский институт автоматики и гидравлики. — № 4001093/63; заявл. 02.01.1986; опубл. 10.11.1995.
6. Пат. 2059994 Российская Федерация, МПК H02K 19/12 (1995.01). Синхронный электродвигатель / А. Ф. Шевченко; заяв. и патентообл. Новосибирский государственный технический университет. — № 864037981; заявл. 17.03.1986; опубл. 10.05.1996.
7. Meier F. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications / F. Meier. — Stockholm: KTH, 2008. — 165 p.
8. Бормотов А. В. Обмоточный коэффициент вентильных электродвигателей с зубцовыми, сосредоточенными обмотками статора / А. В. Бормотов, В. В. Николаев, Ю. Сан, А. П. Сеньков // Труды VIII Международной (XIX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2014. — Самара, 2014. — Т. 2. — С. 72–75.
9. Сеньков А. П. Обмоточный коэффициент и потери в роторе вентильных электродвигателей с зубцовыми обмотками статора / А. П. Сеньков, А. В. Бормотов, Д. Ю. Седунов // Вестник Московского авиационного института. — 2015. — Т. 22. — № 3. — С. 122–131.
10. Копылов И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. — М.: Высш. шк., 2002. — 757 с.

COMPARISON OF WEIGHT AND OVERALL DIMENSIONS OF BLDC MOTOR WITH DISTRIBUTED AND CONCENTRATED STATOR WINDINGS

The article carried out a comparison of the weight and dimensions of the two types of brushless DC motors with permanent magnets on the rotor (PMM), which have different stator designs: with distributed and with a tooth pitch stator windings. It is shown that in machines with tooth pitch stator windings in the stator bore diameter, a predetermined number of pole pairs of the rotor can be significantly higher than in machines with distributed stator windings. Consequently, in step PMM with tooth pitch stator windings magnetic flux decreases, and decreases the required width of the magnetic yoke of the stator and rotor. As a result, weight and dimensions of magnetic conductor of the stator and rotor in PMM with tooth pitch stator windings are less. In addition, coils of PMM with tooth pitch stator windings have a length of less than coils of PMM with distributed windings of the stator, which also reduces the weight and dimensions of the stator winding.

Keywords: brushless permanent magnet dc motor, permanent magnets, dimensions and weight, concentrated windings, distributed stator windings.

REFERENCES

1. Baranov, M. V., et al. *Jelektricheskie sledjashhie privody s momentnym upravleniem ispolnitelnymi dvigateljami*. M.: Izd-vo MGTU im. N. Je. Baumana, 2006.
2. Chen, Anyuan, Robert Nilssen, and Arne Nysveen. "Performance comparisons among radial flux, multi-stage axial flux and three-phase transverse flux PM machines for downhole applications." *Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC'09. IEEE International*. IEEE, 2009: 1010–1017. DOI: 10.1109/IEMDC.2009.5075328.
3. Kalmykov, A. N., A. A. Sen'kov, A. P. Sen'kov, and A. A. Rjabov. "Ventilnyj jelektrodvигatel s poperechnym magnitnym potokom i diskovym rotorom." *Russian Electrical Engineering* 4 (2016): 24–28.
4. Lebedev, N. I., and I. E. Ovchinnikov. *Beskontaktnye dvigateli postojannogo toka*. L.: Nauka, leningradskoe otdelenie, 1979.
5. Brodovskij, V. N., E. S. Ivanov, M. I. Luzin, V. P. Petuhov, and M. I. Pjatkov. *Sinhronnyj jelektrodvигatel*. Russian Federation, assignee. Patent 2047936. 10 Nov. 1995.
6. Shevchenko, A. F. *Sinhronnyj jelektrodvигatel*. Russian Federation, assignee. Patent 2059994. 10 May 1996.
7. Meier, F. *Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications*. Stockholm: KTH, 2008.
8. Bormotov, A. V., V. V. Nikolaev, Ju. San, and A. P. Sen'kov. "Obmotochnyj koeficient ventilnyh jelektrodvигatelej s zubcovymi, sosredotochennymi obmotkami statora." *Trudy VIII mezhdunarodnoj (XIX Vserossijskoj) konferencii po avtomatizirovannomu jelektroprivodu AJeP-2014*. Saransk, 2014. Vol. 2. 72–75.
9. Sen'kov, A. P., A. V. Bormotov, and D. Ju. Sedunov. "Winding coefficient and rotor losses in servo motors with stator tooth concentrated windings." *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta* 22.3 (2015): 122–131.
10. Kopylov, I. P. *Proektirovanie jelektricheskikh mashin*. M.: «Vysshaja shkola», 2002.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сан Ю — аспирант.
Научный руководитель:
Сеньков Алексей Петрович.
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»
kws@smtu.ru
Сеньков Алексей Петрович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «СПбГМТУ»
senkov@smtu.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Thsan Yu — postgraduate.
Supervisor:
Sen'kov Aleksey Petrovich.
St Petersburg State Marine Technical University
kws@smtu.ru
Sen'kov Aleksey Petrovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
St Petersburg State Marine Technical University
senkov@smtu.ru

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2016 года

УДК 621.311.1

**А. Б. Каракаев,
А. В. Луканин**

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ МЕЖДУ ПОКАЗАТЕЛЯМИ НАДЕЖНОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЕМ ГЛУБИНЫ КОНТРОЛЯ СУДОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В статье рассмотрены основные показатели контролепригодности, относящиеся к надежности, контролю работоспособности и поиска дефектов в элементах судовой электроэнергетической системы (СЭЭС). Обоснованы и сформулированы основные задачи синтеза контролепригодности с учетом ограничений конструктивно-технологического характера и массогабаритных особенностей по минимуму точек контроля, а также рациональному размещению компонентов объекта в конструктивных блоках, среднее количество которых определяется точностью глубины контроля, позволяющей анализировать правильность функционирования, работоспособность, а следовательно, и место обнаружения объекта.