

На схеме ВДПМ (рис. 1) показана полярность постоянных магнитов, расположенных на поверхности ротора, и направление намагничивающих сил катушек фаз U , V и W при постоянном токе в фазах.

Каждая фаза ВДПМ рассматриваемого вида состоит из зубцовых катушек, и общее потокоцепление фазы равно сумме потокоцеплений зубцовых катушек фазы. Рассмотрим характер изменения магнитного потока одного зубца статора, созданного постоянными магнитами при повороте ротора. Магнитный поток Φ_z зубца статора может быть определен с высокой точностью для заданной конструкции ВДПМ с помощью программ для электромагнитных расчетов, например Elcut. На рис. 2 показано, как изменяется магнитный поток, созданный полюсами ротора, через средний зубец фазы U , расположенный на горизонтальной оси диаметрального сечения двигателя, при повороте ротора.

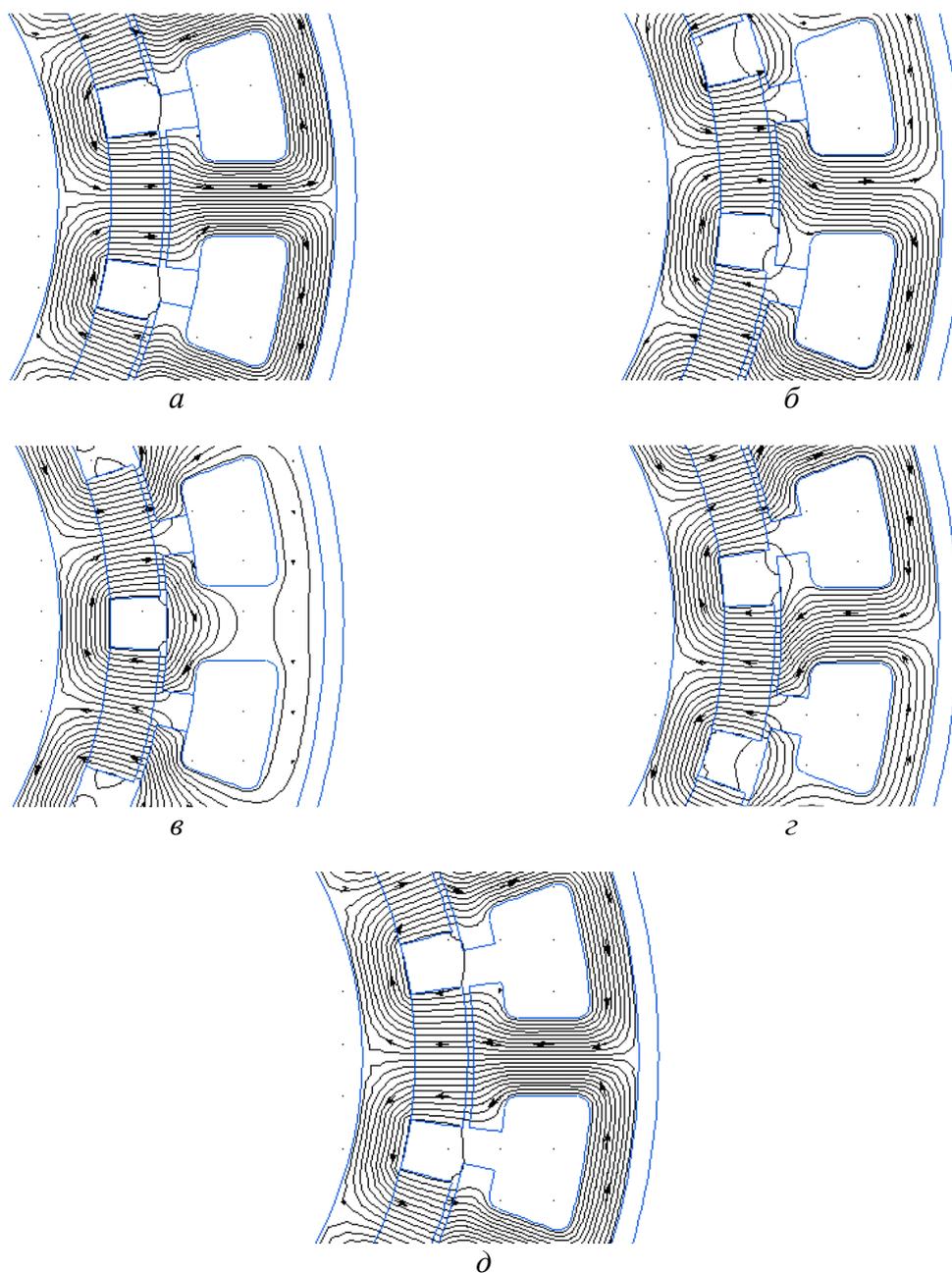


Рис. 2. Изменение магнитного потока через один из зубцов магнитопровода статора при повороте ротора:

$$\begin{aligned}
 a - \alpha_3 = 0^\circ; \alpha_{3e} = 0^\circ e; \quad б - \alpha_3 = 5,625^\circ; \alpha_{3e} = 45^\circ e; \quad в - \alpha_3 = 11,25^\circ; \alpha_{3e} = 90^\circ e; \\
 г - \alpha_3 = 16,875^\circ; \alpha_{3e} = 135^\circ e; \quad д - \alpha_3 = 22,5^\circ; \alpha_{3e} = 180^\circ e
 \end{aligned}$$

Геометрический угол α_3 положения ротора относительно статора измерялся между осью симметрии зубца магнитопровода статора (горизонтальная ось на рис. 2) и осью симметрии полюса ротора. Угол α_{3e} , выраженный в электрических градусах, равен $\alpha_{3e} = p \cdot \alpha_3$. В табл. 1 приведены результаты измерения, выполненные в пакете Elcut, магнитного потока Φ_3 , проходящего через среднее поперечное сечение указанного зубца магнитопровода статора, для нескольких положений ротора.

Таблица 1

Зависимость магнитного потока, созданного полюсами ротора и проходящего через один из зубцов магнитопровода статора, от угла поворота ротора

$\alpha_{3e}, \text{эл.}^\circ$	0°	$2,5^\circ$	5°	$5,625^\circ$	$7,5^\circ$	10°	$11,25^\circ$	$16,875^\circ$	$22,5^\circ$
$\alpha_{3e}, \text{эл.}^\circ$	$0^\circ e$	$20^\circ e$	$40^\circ e$	$45^\circ e$	$60^\circ e$	$80^\circ e$	$90^\circ e$	$135^\circ e$	$180^\circ e$
$\Phi_3 \cdot 10^3, \text{Вб}$	0,606	0,582	0,480	0,444	0,308	0,103	0	-0,444	-0,606
$\Phi_3 / \Phi_{\text{з макс}}$	1	0,96	0,79	0,73	0,51	0,17	0	-0,73	-1
$\cos \alpha_{3e}$	1	0,94	0,77	0,71	0,5	0,17	0	-0,71	-1

В таблице также приведено изменение магнитного потока зубца статора в относительных единицах и функция $\cos \alpha_{3e}$. Результаты моделирования магнитного поля показывают, что поток ротора, проходящий через зубец магнитопровода статора, изменяется по закону, близкому к косинусу:

$$\Phi_3 = \Phi_{\text{з макс}} \cdot \cos \alpha_{3e}. \quad (1)$$

Поскольку в рассматриваемой модели двигателя погрешность отклонения относительного магнитного потока Φ_3 от функции $\cos \alpha_{3e}$ не превышает 3 %, выражение (1) можно использовать для определения зависимости магнитного потока зубца магнитопровода статора от положения ротора.

Обмотка статора ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора состоит из Θ повторяющихся частей. В каждой части катушки фазы размещены на $z_{\text{гр}}$ зубцах магнитопровода статора. В модели двигателя (рис. 1) $\Theta = 2$ и $z_{\text{гр}} = 3$. Направление намотки катушек фаз чередуется, поэтому потокосцепление катушек фазы в группе зубцов суммируется, хотя направление магнитного потока в зубцах фазы изменяется. Для рассматриваемой модели при $z_{\text{гр}} = 3$ потокосцепление одной группы катушек фазы равно

$$\Psi_\phi = w_k (\Phi_{n-1} + \Phi_n + \Phi_{n+1}), \quad (2)$$

где w_k – число витков одной зубцовой катушки; Φ_n – магнитный поток, связанный со средней катушкой фазы; Φ_{n-1} и Φ_{n+1} – магнитный поток, связанный с двумя другими зубцами фазы.

Будем считать, что угол α_{3e} отсчитывается от оси симметрии зубца магнитопровода статора, на котором расположена средняя катушка фазы U , и осью симметрии одного из полюсов ротора. Тогда выражение (2) для одной группы катушек фазы U можно записать в виде

$$\Psi_{U1} = w_k [\Phi_{\text{з макс}} \cdot \cos(\alpha_{3e} - y_e) + \Phi_{\text{з макс}} \cdot \cos \alpha_{3e} + \Phi_{\text{з макс}} \cdot \cos(\alpha_{3e} + y_e)],$$

где $y_e = p \cdot 360^\circ / z$ – шаг зубцовой обмотки.

Можно убедиться, что максимальное потокосцепление группы катушек фазы с полюсами ротора возникает при $\alpha_{3e} = 0$ (табл. 2), при этом суммарное потокосцепление катушек фазы, так же как и Φ_3 , изменяется от α_{3e} в функции косинуса.

Таблица 2

Изменение потокосцепления группы катушек фазы U с полюсами ротора от α_{3e}

$\alpha_{3e}, \text{эл.}^\circ$	$-45^\circ e$	$-20^\circ e$	$0^\circ e$	$20^\circ e$	$45^\circ e$	$60^\circ e$	$90^\circ e$	$135^\circ e$	$180^\circ e$
$\Psi_U \cdot 10^3, \text{Вб}$	1,234	1,64	1,745	1,64	1,234	0,872	0	-1,234	-1
$\Psi_U / \Psi_U(0)$	0,707	0,94	1	0,94	0,707	0,5	0	-0,707	-1
$\cos \alpha_{3e}$	0,707	0,94	1	0,94	0,707	0,5	0	-0,707	-1

Общее потокосцепление фазы U двигателя, имеющего $z_{\text{гр}} = 3$, можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \Psi_U &= \Theta \cdot w_k \cdot \Phi_{\text{змакс}} \left[\cos(\alpha_{3e} - y_e) + \cos \alpha_{3e} + \cos(\alpha_{3e} + y_e) \right] = \\ &= \Theta \cdot w_k \cdot \Phi_{\text{змакс}} \cdot \cos \alpha_{3e} (1 + 2 \cos y_e). \end{aligned} \quad (3)$$

Потокосцепление фаз V и W с учетом сдвига оси среднего зубца магнитопровода фаз V и W относительно оси среднего зубца фазы U будет равно

$$\Psi_V = \Theta \cdot w_k \cdot \Phi_{\text{змакс}} \cdot \cos \left(\alpha_{3e} - \frac{2\pi}{3} \right) (1 + 2 \cdot \cos y_e); \quad (4)$$

$$\Psi_W = \Theta \cdot w_k \cdot \Phi_{\text{змакс}} \cdot \cos \left(\alpha_{3e} - \frac{4\pi}{3} \right) (1 + 2 \cdot \cos y_e).$$

Заменим в выражениях (3), (4) $\alpha_{3e} = p \cdot \alpha$, где α – геометрический угол между осью статора (ось симметрии среднего зубца магнитопровода статора фазы U) и осью ротора. При вращении ротора потокосцепления фаз статора с полюсами ротора будут изменяться, и в фазах статора будут индуцироваться электродвижущие силы (ЭДС):

$$e_U = -\frac{d\Psi_U}{dt} = \Theta \cdot w_k \cdot \Phi_{\text{змакс}} (1 + 2 \cos y_e) p \frac{d\alpha}{dt} \sin p\alpha; \quad (5)$$

$$e_V = -\frac{d\Psi_2}{dt} = \Theta \cdot w_k \cdot \Phi_{\text{змакс}} (1 + 2 \cos y_e) p \frac{d\alpha}{dt} \sin \left(p\alpha - \frac{2\pi}{3} \right); \quad (6)$$

$$e_W = -\frac{d\Psi_3}{dt} = \Theta \cdot w_k \cdot \Phi_{\text{змакс}} (1 + 2 \cos y_e) p \frac{d\alpha}{dt} \sin \left(p\alpha - \frac{4\pi}{3} \right). \quad (7)$$

В общем случае напряжение питания u_U фазы U , которое вырабатывает система управления ВДПМ, уравнивается суммой ряда составляющих

$$u_U = L_U \frac{di_U}{dt} + i_U \cdot R_U + e_U + M_{UV} \frac{di_V}{dt} + M_{UW} \frac{di_W}{dt}, \quad (8)$$

где i_U – ток фазы U ; $L_U \frac{di_U}{dt}$ – ЭДС самоиндукции фазы U ; L_U – индуктивность фазы U ; $i_U \cdot R_U$ – падение напряжения на активном сопротивлении R_U фазы U ; $M_{UV} \frac{di_V}{dt}$ – ЭДС взаимной индукции фаз U и V ; M_{UV} – взаимная индуктивность фаз U и V ; $M_{UW} \frac{di_W}{dt}$ – ЭДС взаимной индукции фаз U и W ; M_{UW} – взаимная индуктивность фаз U и W .

Уравнения фаз ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора можно упростить, не допуская значительной погрешности. На рис. 3 показано магнитное поле в элементах двигателя, созданное током фазы U , полученное при моделировании в пакете Elcut.

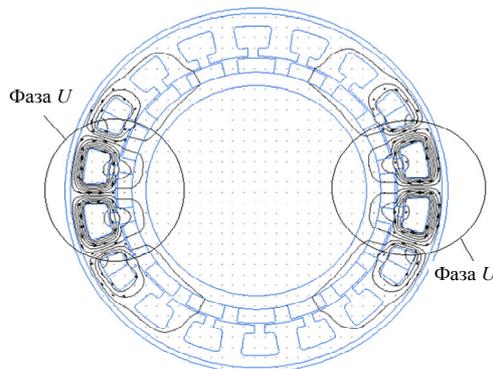


Рис. 3. Магнитное поле, созданное фазой U

Намагничивающие силы постоянных магнитов ротора при моделировании не учитывались. Из рис. 3 видно, что магнитные потоки сосредоточены в зоне размещения катушек фазы U – в 2-х группах зубцов, расположенных в зоне горизонтальной оси диаметрального сечения. Измерения, выполненные в модели, показали, что потокосцепления фазы U с фазами V и W составляют не более 5 % от собственного потокосцепления фазы U . Тогда, не допуская большой погрешности, ЭДС, обусловленные взаимоиндуктивной связью фаз, из уравнений фаз, аналогичных (8), можно исключить:

$$u_U = L_U \frac{di_U}{dt} + i_U \cdot R_U + e_U; \quad (9)$$

$$u_V = L_V \frac{di_V}{dt} + i_V \cdot R_V + e_V; \quad (10)$$

$$u_W = L_W \frac{di_W}{dt} + i_W \cdot R_W + e_W. \quad (11)$$

Индуктивность фаз L_U , L_V и L_W в общем случае содержат постоянную составляющую и переменную составляющую, изменяющуюся по закону, близкому к гармоническому, в функции от $p \cdot \alpha$. Однако при использовании ротора, выполненного по схеме «звездочка», амплитуда переменной составляющей индуктивности намного меньше постоянной составляющей, т. к. магнитная проницаемость постоянных магнитов и воздуха близки по величине. В большинстве практических случаев изменением L_U , L_V и L_W от угла поворота ротора можно пренебречь.

Напряжения на фазах формируются блоком управления и изменяются по синусоидальному закону синхронно с изменением углового положения ротора:

$$u_U = U_m \cdot \sin(p\alpha + \beta_e); \quad (12)$$

$$u_V = U_m \cdot \sin\left(p\alpha + \beta_e - 2 \cdot \frac{\pi}{3}\right); \quad (13)$$

$$u_W = U_m \cdot \sin\left(p\alpha + \beta_e - 4 \cdot \frac{\pi}{3}\right), \quad (14)$$

где β_e – начальная фаза напряжения, которая выбирается таким образом, чтобы обеспечить максимальный момент на валу двигателя M .

Мгновенную мощность p_m на валу двигателя можно найти по произведению токов и э.д.с. фаз:

$$p_m = e_U \cdot i_U + e_V \cdot i_V + e_W \cdot i_W.$$

Отсюда момент на валу двигателя будет равен

$$M = (e_U \cdot i_U + e_V \cdot i_V + e_W \cdot i_W) / (d\alpha / dt). \quad (15)$$

Последним в систему уравнений ВДПМ нужно включить уравнение вращения вала двигателя с заданной нагрузкой

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} = M - M_c, \quad (16)$$

где J – суммарный момент инерции, включающий приведенный к валу двигателя момент инерции нагрузки и момент инерции ротора двигателя; M_c – приведенный к валу двигателя момент сопротивления нагрузки.

Таким образом, в систему уравнений динамики ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора входят выражения для расчета ЭДС в фазах (5)–(7), уравнения фаз (9)–(11) с учетом характера изменения напряжений на фазах (12)–(14), выражение для расчета момента на валу (15) и уравнение вращения ротора двигателя с заданной нагрузкой (16).

На рис. 4 приведены кривые изменения во времени напряжений и токов фаз, а также частоты вращения ротора, рассчитанные для двигателя, диаметрального сечение которого показано на рис. 1.

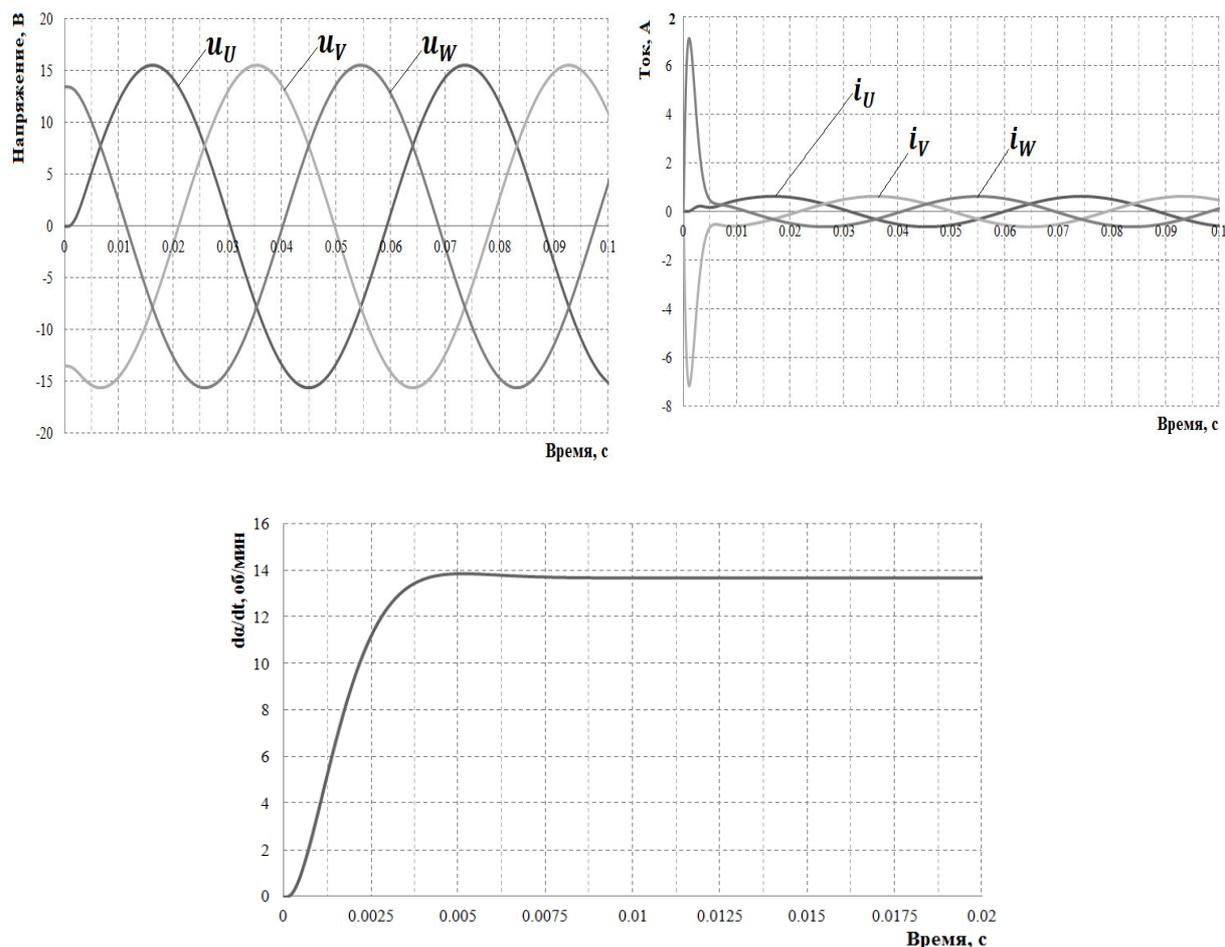


Рис. 4. Кривые изменения во времени напряжений, токов фаз и частоты вращения ротора

Некоторые параметры двигателя: амплитуда напряжений питания $U_m = 15$ В; $w_k = 120$; индуктивность фазы $L = 0,001$ Гн; сопротивление фазы $R = 1,5$ Ом; $M_c = 1$ Н · м; $J = 0,002$ кг · м². Расчет выполнен по программе [5]. Программа позволяет рассчитать переходные процессы без ограничения максимального тока фаз и при введении ограничения тока фаз. На рис. 4 приведены результаты расчета без ограничения тока фаз.

Обсуждение полученных результатов

В уравнениях динамики ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора отражаются особенности конструкции этого вида машин. Так как в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора каждая фаза состоит из зубцовых катушек, то потокосцепление фаз удобнее определять по магнитным потокам, проходящим через зубцы магнитопровода статора, на которых расположены катушки фазы. Потокосцепление фазы максимально при совпадении оси среднего зубца магнитопровода статора в группе зубцов, на которых расположены катушки данной фазы, с осью полюса ротора. Индуктивная связь фаз статора мала, и систему уравнений можно упростить, исключив из уравнений фаз ЭДС взаимной индуктивности фаз.

Выводы

1. Потокосцепление зубцовых катушек фазы и фазы в целом изменяется по закону косинуса угла между осью среднего зубца магнитопровода статора в группе зубцов, на которых расположены катушки данной фазы, и осью полюса ротора.

2. Магнитные потоки, созданные током фазы, в ВДПМ с зубцовым шагом обмотки статора протекают практически только через зубцы магнитопровода статора, на которых расположены катушки данной фазы. Вследствие этого взаимоиндуктивной связью фаз можно пренебречь и исключить из уравнений фаз ЭДС, обусловленные взаимной индуктивностью фаз.

3. В систему уравнений динамики ВДПМ входят выражения для расчета ЭДС в фазах, уравнения электрического равновесия фаз, выражение для расчета момента двигателя и уравнение вращения ротора с заданной нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М. В., Бродовский В. Н. и др. Электрические следящие приводы с моментным управлением исполнительными двигателями. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 240 с.
2. Пат. 2047936 Российская Федерация. Синхронный электродвигатель. Бродовский В. Н., Иванов Е. С., Лузин М. И., Петухов В. П., Пятков М. И.; № 4001093/63; заявл. 02.01.1986; опубл. 10.11.1995.
3. Сан Ю, Сеньков А. П. Сравнение массогабаритных показателей вентильных электродвигателей с распределенной и зубцовой обмотками статора // Вестн. гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2016. Вып. № 3 (37). С. 174–180.
4. Meier F. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications. Stockholm: KTH, 2008. 165 p.
5. Сеньков А. П., Сан Ю. Динамические процессы вентильного электродвигателя. Свидетельство о гос. рег. программы для ЭВМ № 2016617205; зарег. 06.04.2016.

Статья поступила в редакцию 20.09.2016

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Лавренов Сергей Николаевич – Россия, 195267, Санкт-Петербург; ОАО «НИИ Электромера»; начальник отдела силовой электроники и преобразовательной техники; sergeylavrenov@mail.ru.

Сеньков Алексей Петрович – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; г-р техн. наук, доцент; профессор кафедры электротехники и электрооборудования судов; senkov@smtu.ru.

Сан Ю – Россия, 190008, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; аспирант кафедры электротехники и электрооборудования судов; kws@smtu.ru.



S. N. Lavrenov, A. P. Senkov, Yu Thsan

DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PERMANENT MAGNET MOTORS WITH TOOTH PITCH OF STATOR WINDING

Abstract. In the permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding, stator phases consist of coils, each of them is placed on a tooth of the magnetic circuit of the stator. The main advantage of this type of machines is an ability to run the rotor with a maximum number of pole pairs. This makes it possible to diminish the width of the rotor yoke and significantly reduce the weight and the moment of inertia of the rotor. Flux linkage and electromotive force of the phases in the permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding can be easily determined by the magnetic flux passing through one of the teeth of the stator magnetic circuit, in which the coil of the phase is located. Mutual inductance of the phases in the permanent magnet motors with tooth

pitch is small and while calculating the phase currents the inductive coupling of the phases can be neglected. The presented system of equations allows to calculate the dynamic characteristics of permanent magnet motors with tooth pitch of stator winding.

Key words: permanent magnet motor, permanent magnets, tooth pitch of stator winding, magnetic flux, inductive phase coupling, dynamic characteristics.

REFERENCES

1. Baranov M. V., Brodovskii V. N. i dr. *Elektricheskie slediashchie privody s momentnym upravleniem ispolnitel'nymi dvigateliami* [Electric follower drive with actuating motor control]. Moscow, Izd-vo MGTU imeni N. E. Baumana, 2006. 240 p.
2. Brodovskii V. N., Ivanov E. S., Luzin M. I., Petukhov V. P., Piatkov M. I. *Sinkhronnyi elektrodvigatel'* [Synchronous motor]. Patent RF no. 2047936, 10.11.1995.
3. San Iu, Sen'kov A. P. Sravnenie massogabaritnykh pokazatelei ventil'nykh elektrodvigatelei s raspredelennoi i zubtsovoi obmotkami statora [Comparison of mass parameters of permanent magnet motors with distributed and tooth stator winding]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, iss. no. 3 (37), pp. 174–180.
4. Meier F. Permanent-magnet synchronous machines with non-overlapping concentrated windings for low-speed direct-drive applications. Stockholm: KTH, 2008. 165 p.
5. Sen'kov A. P., San Iu. *Dinamicheskie protsessy ventil'nogo elektrodvigatel'ia* [Dynamic processes of permanent magnet motor]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM no. 2016617205; 06.04.2016.

The article submitted to the editors 20.09.2016

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Lavrenov Sergey Nikolaevich – Russia, 195267, Saint-Petersburg; JSC "Scientific Research Institute Electromera"; Head of the Department of Power Electronics and Converter Equipment; sergeylavrenov@mail.ru.

Senkov Alexey Petrovich – Russia, 190008, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Electrical Engineering and Marine Equipment; senkov@smtu.ru

Thsan Yu – Russia, 190008, Saint-Petersburg; Saint-Petersburg State Marine Technical University; Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering and Marine Equipment; kws@smtu.ru.

