

И. Е. Овчинников, А. В. Егоров

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПОВОРОТНОЙ ПЛАТФОРМЫ ТЕЛЕСКОПА

Предложена математическая модель дискового вентильного двигателя поворотной платформы телескопа. Особенность двигателя заключается в разделении трехфазной статорной обмотки на три неравные трехфазные системы, которые запитываются от отдельных инверторов и взаимодействуют с общим дисковым многополюсным ротором. Исследуется влияние несимметрии статорных обмоток на статические характеристики двигателя.

Ключевые слова: вентильный двигатель, сегментированная (разделенная) статорная обмотка, элементарный момент, статорная катушка.

Применение непосредственного привода с вентильным двигателем (ВД) в приводе поворотной платформы было исследовано в работе [1], где рассматривались упрощенная математическая модель, не в полной мере учитывающая электромагнитные процессы [2], а статор имел только одну трехфазную обмотку.

В настоящей статье анализируются статические характеристики двигателя, в котором в целях увеличения надежности всей системы дисковый беззубцовый статор разделен на три отдельные зоны. При этом каждая зона содержит собственную трехфазную обмотку, питание которой осуществляется от отдельного инвертора. Все инверторы управляются от общего датчика положения ротора, формирующего сигнал, который вырабатывает напряжение синусоидального питания фаз двигателя. Такой принцип позволяет в случае внезапного отказа одной или даже двух

независимых статорных цепей легко исключать их из рабочего режима, обеспечивая функционирование системы наведения телескопа с помощью двух или одной из оставшихся систем.

Общая схема беззубцового дискового ВД с постоянными магнитами (ПМ) показана на рис. 1, а. Дисковый диэлектрический статор 1 содержит три системы трехфазных обмоток, выполненных для большого числа пар полюсов и состоящих из сосредоточенных неперекрещивающихся катушек. Статор, в котором отсутствуют элементы, выполненные из электротехнической стали, прикрепляется к неподвижной станине 7 всего устройства; ротор 2 состоит из двух наружных дисков с постоянными магнитами 3 из редкоземельного материала. Статор 1 с обмотками помещен в кольцевом зазоре между магнитами 3. Диски ротора 2 выполнены из стали и служат внешним магнитопроводом. Дисковый ротор непосредственно передает момент на поворотную тумбу 4, опорами которой служат подпятник 5 и радиальный подшипник 6. Опоры могут быть выполнены с использованием либо подшипников скольжения, либо магнитного или воздушного подвеса.

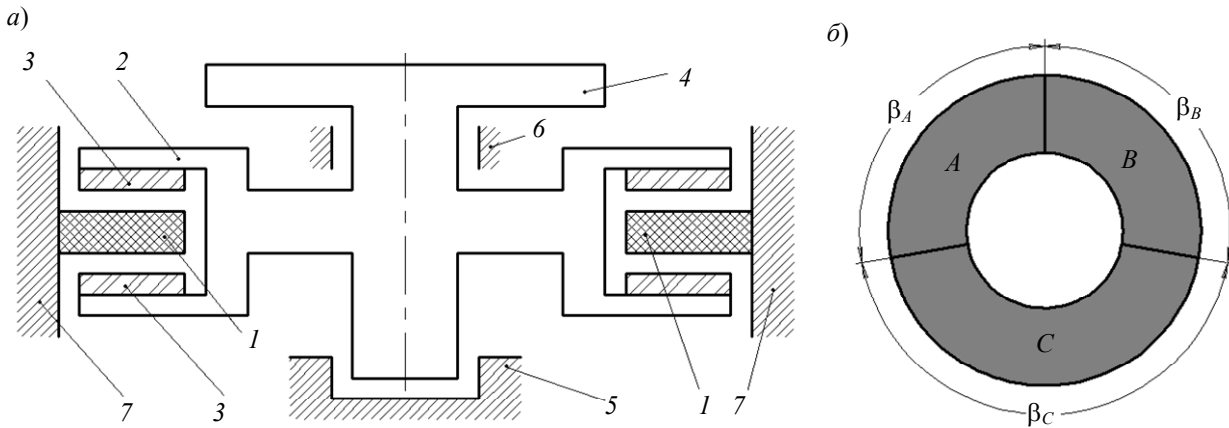


Рис. 1

На рис. 1, б условно показана схема дискового статора, разделенного на три сектора (зоны) A , B и C , каждый из которых содержит свою трехфазную обмотку. Особенность рассматриваемой конструкции состоит в том, что в силу технических и конструктивных причин зоны A , B и C имеют разный угловой размер β : положим, что $\beta_A = \beta_B \neq \beta_C$, причем $\beta_C > \beta_A$.

Структурная схема системы вентильных двигателей представлена на рис. 2, а, где И(К) — инвертор (коммутатор), ДПР — датчик положения ротора. Фазная обмотка каждой трехфазной системы, расположенной в зонах A , B , C , подсоединена к отдельному инвертору, выполненному на четырех биполярных транзисторах с изолированным затвором (IGBT) и четырех обратных диодах (рис. 2, б).

Все три блока обмоток A , B и C могут управляться от единой системы управления (СУ), к которой они подключены.

Рассмотрим, к чему приводит несимметрия системы A , B и C . Поскольку, как говорилось выше, угловой размер сектора β_C больше чем аналогичный размер зон A и B , то и число катушек (секций) обмотки, входящих в зону C , будет больше чем аналогичный показатель для зон A и B . В то же время все катушки (секции) обмотки, принадлежащие зонам A , B и C , совершенно одинаковые. Обозначая число катушек в фазе как N , а число витков фаз — как w_1 , можем записать

$$\frac{N_C}{N_A} = \frac{N_C}{N_B} = \frac{w_{1C}}{w_{1A}} = \frac{w_{1C}}{w_{1B}} = \alpha_C > 1, \quad (1)$$

где α_C — коэффициент несимметрии фаз.

Активное сопротивление фазы

$$R_1 = \rho l_{\text{ср}} w_1 / q_M, \quad (2)$$

где ρ — удельное сопротивление меди, Ом·м; l_{cp} — средняя длина витка катушки, м; q_m — сечение медного проводника, м².

Значение пускового момента, создаваемого каждым сектором с трехфазной обмоткой, питаемой синусоидальным током I_{II} [2], определяется как

$$M_{II} = pk_{01}w_1\Phi I_{II} = pk_{01}w_1\Phi \frac{U_m}{R_1} = pk_{01} \frac{U_m \Phi q_m}{l_{cp}\rho}, \quad (3)$$

здесь p — число пар полюсов ротора, k_{01} — обмоточный коэффициент фазы, Φ — поток, создаваемый постоянными магнитами и приходящийся на одну пару полюсов, U_m — амплитуда фазного напряжения.

Таким образом, пусковой момент при заданном сечении медного проводника и средней длине витка катушки не зависит от числа катушек (или числа витков w_1), входящих в фазу двигателя, и для обмоток зон A , B и C будет одинаков.

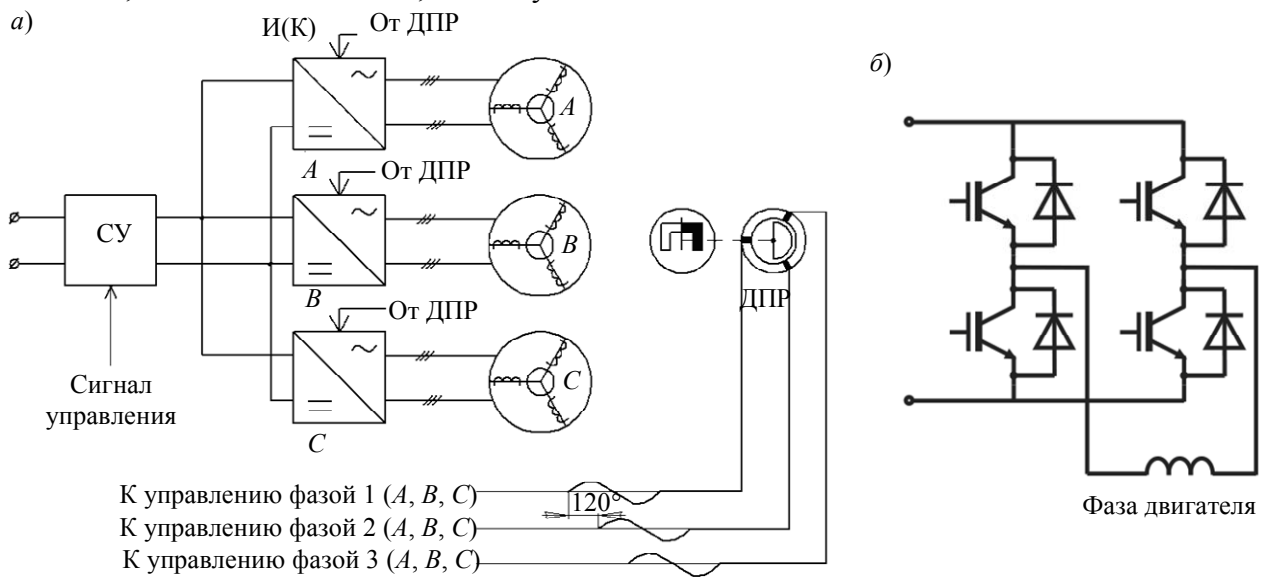


Рис. 2

Другой вывод относится к скорости идеального холостого хода двигателя. Так, в случае отсутствия момента нагрузки на валу скорость идеального холостого хода будет определяться равенством амплитуды приложенного фазного напряжения U_m и амплитуды противоЭДС вращения E_m .

Но $E_m = pk_{01}w_1\Phi\Omega$ (где Ω — угловая скорость ротора), отсюда угловая скорость идеального холостого хода двигателя для разного количества чисел витков фаз, принадлежащих зонам A , B и C , определяется как

$$(\Omega_{x.x})_C = \frac{U_m}{pk_{01}w_{1C}\Phi}, \quad (\Omega_{x.x})_{A,B} = \frac{U_m}{pk_{01}w_{1A}\Phi}, \quad \frac{(\Omega_{x.x})_C}{(\Omega_{x.x})_{A,B}} = \frac{1}{\alpha_C}. \quad (4)$$

Скорость холостого хода двигателя со статором в зоне C будет меньше, чем для зон A и B , поскольку согласно формуле (1) $w_{1C} > w_{1A,B}$.

Здесь и далее совокупность независимой трехфазной обмотки, размещенной в каком-либо из секторов статора A , B или C , и дискового ротора с постоянными магнитами будем называть элементарными двигателями или просто двигателями с указанием, в каком сегменте статора расположена обмотка. Использование этого названия вполне допустимо, так как принцип действия и назначение каждого такого элементарного двигателя не отличаются от аналогичных характеристик исходного двигателя, статорную обмотку которого предлагается

секционировать, а при совместной работе элементарных двигателей действительны все особенности, присущие многодвигательным системам.

Таким образом, вид механических характеристик двигателей A , B и C , работающих на один общий вал (с общим ротором), а значит, имеющих одинаковую скорость Ω , будет соответствовать графику, представленному на рис. 3.

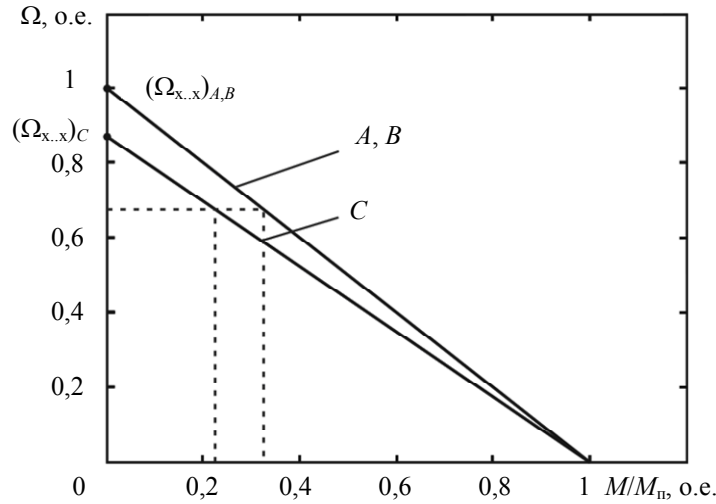


Рис. 3

Характеристики представлены в относительных единицах, за базовые величины приняты скорость холостого хода и пусковой момент двигателя с обмоткой в зоне A . Анализ рисунка показывает, что для любого значения скорости Ω двигатель, принадлежащий зоне C , будет создавать меньший вращающий момент, чем два других, имеющих одинаковое количество витков обмотки и геометрию расположения в зонах A и B .

Оценим индуктивность фаз двигателей зон A , B и C . Каждая фаза двигателя состоит из одинаковых последовательно соединенных катушек с числом витков w_k . Следовательно, собственная индуктивность фазы может быть оценена формулой

$$L_1 = NG_3 (w_k)^2,$$

где G_3 — эквивалентная магнитная проводимость для потока, создаваемого катушкой, Гн.

Поскольку число катушек N определяется соотношением (1), то

$$L_{1C} = \alpha_C L_{1A} = \alpha_C L_{1B}. \quad (5)$$

Теперь, учитывая соотношения (3)—(5), можем составить уравнения математической модели несимметричного вентильного двигателя. Рассмотрим случай питания фаз синусоидальным напряжением, что необходимо для обеспечения равномерности электромагнитного момента и повышения точности всей системы слежения.

Запишем уравнения для электромагнитных моментов, создаваемых трехфазными двигателями в зонах A , B и C соответственно:

$$\left. \begin{aligned} M_A = M_B = C'_{M_A} \left[i_{A1} \sin(p\vartheta) + i_{A2} \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_{A3} \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) \right], \\ M_C = C'_{M_C} \left[i_{C1} \sin(p\vartheta) + i_{C2} \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) + i_{C3} \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Здесь $C'_{M_A} = pk_{01}w_{1A}\Phi$, $C'_{M_A} = C'_{M_B}$, $C'_{M_C} = pk_{01}w_{1C}\Phi$, $w_{1C} = \alpha_C w_{1A}$, $C'_{M_C} = \alpha_C C'_{M_A}$; C'_{M_A} , C'_{M_B} , C'_{M_C} — коэффициенты моментов, i_{An} , i_{Bn} , i_{Cn} — фазные токи зон A , B и C , n — порядковый номер фазы ($n = 1, 2, 3$); ϑ — угол поворота ротора, в геометрических радианах.

Заметим, что в отличие от обычных синхронных машин переменного тока, где $\vartheta = \Omega_c t$ — угол сетевого напряжения, $\Omega_c = 2\pi f_c$ — круговая частота питающей сети, вентиляльный двигатель привода телескопа работает в широком диапазоне скоростей, поэтому в рассматриваемом случае $\vartheta = \int_0^t \Omega dt$.

Запишем, далее, уравнения для фазных токов зон A, B, C . Зоны A и B полностью идентичны, поэтому $i_A = i_B$. Таким образом, достаточно вывести уравнения для токов зон A и C :

$$\left. \begin{aligned} \frac{3}{2} L_A \frac{di_{A1}}{dt} + i_{A1} R_A + C'_{MA} \frac{d\vartheta}{dt} \sin(p\vartheta) &= U_m \sin(p\vartheta); \\ \frac{3}{2} L_A \frac{di_{A2}}{dt} + i_{A2} R_A + C'_{MA} \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right); \\ \frac{3}{2} L_A \frac{di_{A3}}{dt} + i_{A3} R_A + C'_{MA} \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right); \\ \frac{3}{2} L_C \frac{di_{C1}}{dt} + i_{C1} R_C + C'_{MC} \frac{d\vartheta}{dt} \sin(p\vartheta) &= U_m \sin(p\vartheta); \\ \frac{3}{2} L_C \frac{di_{C2}}{dt} + i_{C2} R_C + C'_{MC} \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right); \\ \frac{3}{2} L_C \frac{di_{C3}}{dt} + i_{C3} R_C + C'_{MC} \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

здесь L_A, L_C — собственные индуктивности фаз; $C'_{MA} = C'_{EA}, C'_{MC} = C'_{EC}$ — коэффициенты противоЭДС, равные коэффициентам моментов в формулах (6); R_A, R_C — активные сопротивления фаз, расположенных в статорных зонах A и C .

В соответствии с уравнениями (1), (2) и (5)

$$R_C = \alpha_C R_A, L_C = \alpha_C L_A. \quad (8)$$

Амплитудное значение фазных напряжений U_m зависит от сигнала управления.

С учетом значений R_C и L_C (8) систему уравнений (7) запишем в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{3}{2} L_A \frac{di_{A1}}{dt} + i_{A1} R_A + C'_{MA} \frac{d\vartheta}{dt} \sin(p\vartheta) &= U_m \sin(p\vartheta); \\ \frac{3}{2} L_A \frac{di_{A2}}{dt} + i_{A2} R_A + C'_{MA} \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right); \\ \frac{3}{2} L_A \frac{di_{A3}}{dt} + i_{A3} R_A + C'_{MA} \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right); \\ \frac{3}{2} L_A \alpha_C \frac{di_{C1}}{dt} + i_{C1} R_A \alpha_C + C'_{MA} \alpha_C \frac{d\vartheta}{dt} \sin(p\vartheta) &= U_m \sin(p\vartheta); \\ \frac{3}{2} L_A \alpha_C \frac{di_{C2}}{dt} + i_{C2} R_A \alpha_C + C'_{MA} \alpha_C \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta - \frac{2}{3}\pi\right), \\ \frac{3}{2} L_A \alpha_C \frac{di_{C3}}{dt} + i_{C3} R_A \alpha_C + C'_{MA} \alpha_C \frac{d\vartheta}{dt} \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right) &= U_m \sin\left(p\vartheta + \frac{2}{3}\pi\right). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Для исследования статических характеристик двигателя следует положить в системе уравнений (9) $\frac{d\vartheta}{dt} = \Omega = \text{const}$, $\vartheta = \Omega t$. В этом случае решение для установившихся значений токов фаз имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} i_{A1} = i_{B1} &= I_m \sin(p\Omega t - \varphi), & i_{C1} &= I_{mC} \sin(p\Omega t - \varphi), \\ i_{A2} = i_{B2} &= I_m \sin(p\Omega t - 2\pi/3 - \varphi), & i_{C2} &= I_{mC} \sin(p\Omega t - 2\pi/3 - \varphi), \\ i_{A3} = i_{B3} &= I_m \sin(p\Omega t + 2\pi/3 - \varphi), & i_{C3} &= I_{mC} \sin(p\Omega t + 2\pi/3 - \varphi), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где

$$I_m = \frac{U_m - C'_M \Omega}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{3}{2} Lp\Omega\right)^2}}, \quad I_{mC} = \frac{\frac{U_m}{\alpha_C} - C'_M \Omega}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{3}{2} Lp\Omega\right)^2}}, \quad \varphi = \arctg\left(\frac{3p\Omega L}{2R}\right), \quad C'_M = C'_{MA} = C'_{MB};$$

здесь L , R — индуктивность и активное сопротивление фаз двигателей A и B .

Подставив выражения токов фаз из уравнений (10) в формулы моментов (6), после сложных преобразований получим значения моментов в установившемся режиме при $\Omega = \text{const}$:

$$\left. \begin{aligned} M_A = M_B &= \frac{3}{2} \frac{R}{R^2 + \left(\frac{3}{2} Lp\Omega\right)^2} \left[C'_{MA} U_m - (C'_{MA})^2 \Omega \right], \\ M_C &= \frac{3}{2} \frac{R}{R^2 + \left(\frac{3}{2} Lp\Omega\right)^2} \left[C'_{MA} U_m - \alpha_C (C'_{MA})^2 \Omega \right]. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Суммарный момент, создаваемый всеми тремя элементарными двигателями, имеющими общий ротор и работающими с одинаковыми скоростями, будет равен

$$M_\Sigma = M_A + M_B + M_C = 2M_A + M_C = \frac{3}{2} \frac{R}{R^2 + \left(\frac{3}{2} Lp\Omega\right)^2} \left[3C'_{MA} U_m - (2 + \alpha_C) (C'_{MA})^2 \Omega \right]. \quad (12)$$

Скорость идеального холостого хода $\Omega_{\Sigma_{xx}}$ системы из трех двигателей определяется условием $M_\Sigma = 0$, откуда

$$\Omega_{\Sigma_{xx}} = \frac{3}{2 + \alpha_C} \frac{U_m}{C'_{MA}}. \quad (13)$$

Поскольку $\alpha_C > 1$, то скорость холостого хода оказывается несколько меньшей, чем в случае симметричной обмотки, когда $\alpha_C = 1$. В свою очередь, это означает, что в режиме холостого хода двигатель C будет создавать отрицательный момент M_{C0} , который будет скомпенсирован положительным моментом двигателей A и B .

Подставив значение скорости $\Omega_{\Sigma_{xx}}$ (13) в выражения (11), получим при $\alpha_C > 1$

$$M_{C0} = M_0 \left(1 - \frac{3\alpha_C}{2 + \alpha_C} \right) < 0, \quad M_{A0} = M_{B0} = M_0 \left(1 - \frac{3}{2 + \alpha_C} \right) > 0, \quad M_0 = \frac{3}{2} \frac{C'_{MA} U_m R}{R^2 + \left(\frac{3}{2} Lp\Omega\right)^2}.$$

Отсюда следует, что в режиме холостого хода $M_{\Sigma} = M_{A0} + M_{B0} + M_{C0} = 0$, что подтверждает ранее сказанное.

Выражение (12) позволяет построить механическую характеристику многодвигательной системы $\Omega = f_1(M_{\Sigma})$ при $U_m = \text{const}$, полагая, что $M_{\Sigma} = M_H$ — момент нагрузки, а также ее регулировочную характеристику $\Omega = f_2(U_m)$ при $M_{\Sigma} = M_H = \text{const}$.

Для построения характеристик целесообразно перевести уравнение (12) в безразмерную форму. Приняв в качестве базовых величин суммарный пусковой момент $M_{\bar{6}} = 3/2 \cdot 3C_{M_A}' U_m / R$, угловую скорость холостого хода $\Omega_{\bar{6}} = \Omega_{\Sigma_{x,x}}$ (согласно 13) и номинальную амплитуду фазного напряжения $U_{\bar{6}} = (U_m)_{\Pi}$, а в качестве безразмерных — относительную скорость многодвигательной системы $\omega = \Omega / \Omega_{\bar{6}}$, относительный момент $\mu = M_{\Sigma} / M_{\bar{6}}$ и относительное напряжение $u = U_m / (U_m)_{\Pi}$, получим вместо уравнения (12)

$$\mu = \frac{u - \omega}{1 + (x_{\bar{6}}\omega)^2},$$

где $x_{\bar{6}} = 3p\Omega_{\Sigma_{x,x}} L / (2R)$ — относительное индуктивное сопротивление фазы при скорости холостого хода.

Механическая $\omega = f_1(\mu_{\Sigma})$ при $u = 1$ и регулировочная $\omega = f_2(u)$ при $\mu_{\Sigma} = 0$ характеристики ВД приведены на рис. 4, а, б соответственно. Малая индуктивность фаз и малая скорость холостого хода обуславливают малость параметра $x_{\bar{6}}$ и практически линейность как механической, так и регулировочной характеристик двигателя.

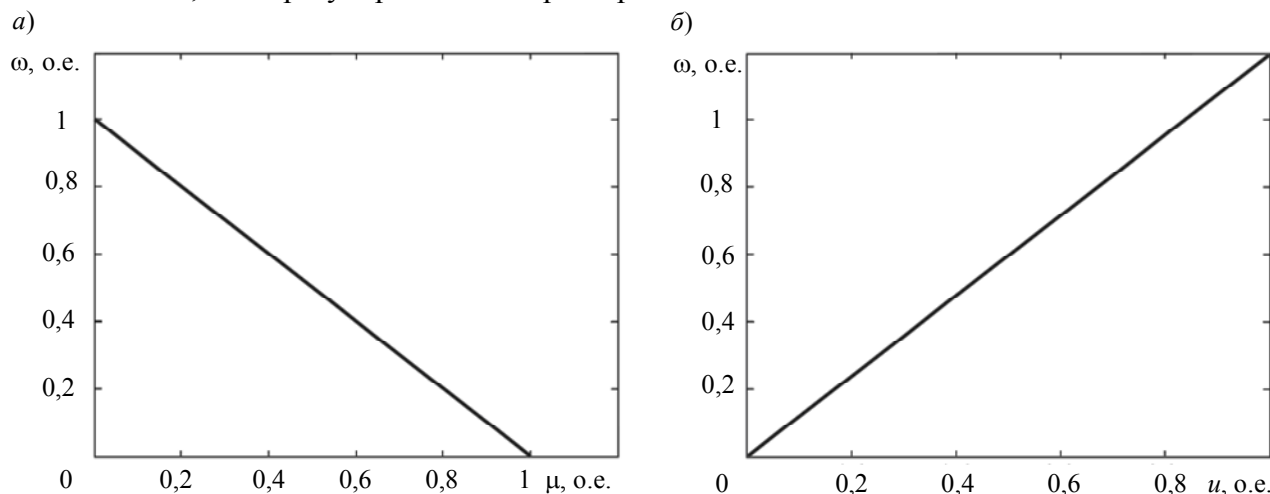


Рис. 4

Выводы.

1. Несимметрия обмоточных зон двигателей, работающих на один вал, приводит к различиям их механических характеристик.
2. В области скоростей, близких к скоростям холостого хода, один из элементарных двигателей, имеющих большую обмоточную зону, начинает создавать тормозной момент, выступающий в качестве момента нагрузки для двух других элементарных двигателей.
3. Несимметрия обмотки приводит к разной загрузке входящих в систему трех двигателей, работающих на один вал.

При исследовании математической модели двигателя принимались следующие значения величин, соответствующие реальным параметрам элементарного двигателя: максимальная амплитуда фазного напряжения $U_m = 100$ В, активное сопротивление фазы двигателя

$R = 7,49$ Ом, индуктивность фазы $L = 0,0117$ Гн, число пар полюсов ротора $p = 44$, коэффициент момента и ЭДС $C_{M_A}' = 217$ Н·м/рад, коэффициент несимметрии фаз $\alpha_C = 1,14$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Овчинников И. Е. Динамика непосредственного привода опорно-поворотного устройства с вентильным двигателем // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2007. Вып. 44.
2. Овчинников И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе: Курс лекций. СПб: КОРОНА-Век, 2006. 336 с.

Сведения об авторах

Игорь Евгеньевич Овчинников

- д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем
- Алексей Вадимович Егоров**
- Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем; мл. научный сотрудник;
E-mail: alexeykey@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Поступила в редакцию
18.01.11 г.