

## ПАРАМЕТРЫ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Радимов И.Н., к.т.н., доц., Гулый М.В.  
 ООО "Завод "Электротехника"  
 Украина, 54028, Николаев, ул. Новозаводская, 19  
 тел. (048) 738-58-55, E-mail: office@zelnk.com

Рымша В.В., д.т.н., проф., Чан Тхи Тху Хыонг  
 Одесский национальный политехнический университет  
 Украина, 65044, Одесса, пр. Шевченко, 1, ИЭЭ, кафедра электрических машин  
 тел. (048) 738-58-55, E-mail: rimsha61@gmail.com, office@zelnk.com

*Наведено розрахунок та ідентифікація параметрів явнополюсного вентильного двигуна з постійними магнітами.*

*Приведен расчет и идентификация параметров явнополюсного вентильного двигателя с постоянными магнитами.*

Заводом "Электротехника" в настоящее время осваивается выпуск вентильных двигателей с постоянными магнитами (ВДПМ) и мотор-редукторов, построенных на базе ВДПМ, для медицинской техники, сварочного оборудования, насосных систем, спецтехники и т.д. [1].

Во всех выпускаемых ВДПМ принята единая идеология конструктивного исполнения, а именно: статор выполняется явнополюсным с малым числом полюсов (зубцов), обмотка статора – катушечная с шагом  $y=1$ , ротор содержит постоянные магниты марки NdFeB. Один из возможных вариантов конструкции трехфазного ВДПМ с числом зубцов статора  $Z_S=6$  и числом полюсов ротора  $2p=8$  представлен на рис. 1.

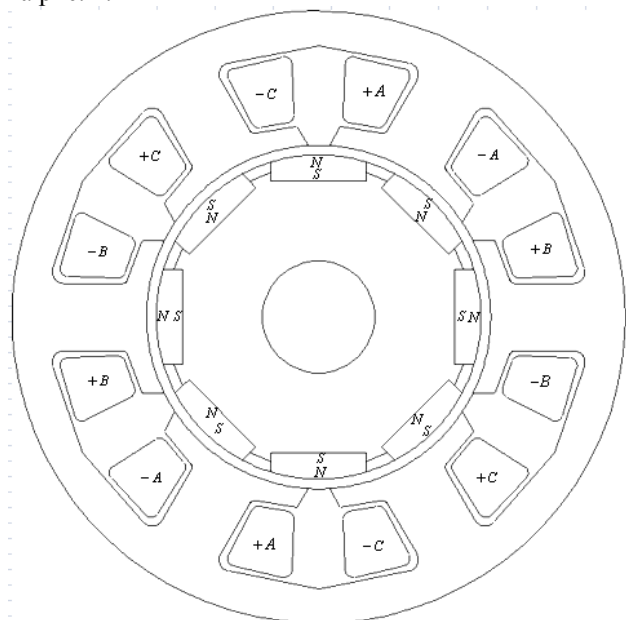
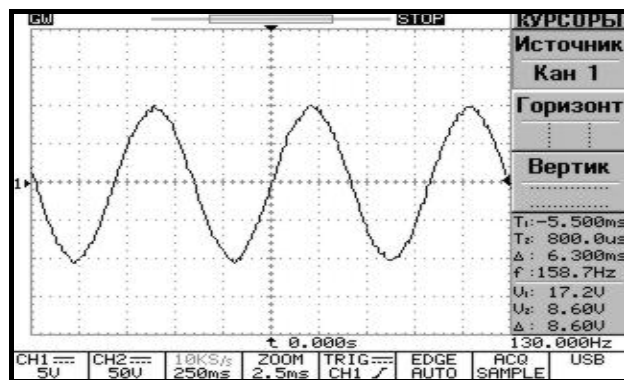


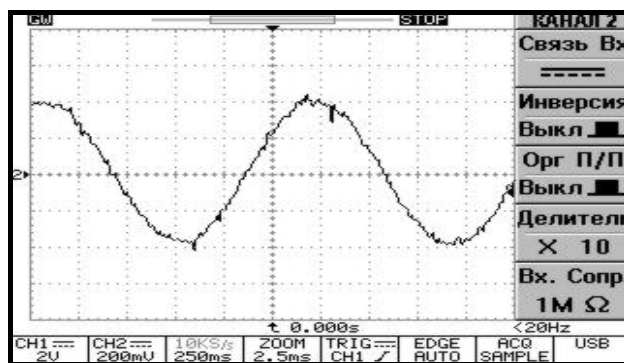
Рис. 1. Поперечное сечение ВДПМ

Несмотря на явнополюсную конструкцию статора с малым числом зубцов и числом пазов на полюс и фазу  $q=1/4$ , как фазные, так и линейные ЭДС в ВДПМ с оптимальными геометрическими соотношениями зубцовой зоны, минимизирующими величину реактивного момента, получаются синусоидальной

формы. Это иллюстрируется рис. 2, где приведены экспериментальные зависимости линейной и фазной ЭДС в функции времени  $e=f(t)$ , записанные с помощью цифрового осциллографа марки GDS-840S.



а)



б)

Рис. 2. Линейная (а) и фазная (б) ЭДС обмотки статора

Представленные на рис. 2 зависимости получены для ВДПМ, данные которого приведены в табл. 1.

Таблица 1

Внешний диаметр, мм	57
Внутренний диаметр статора, мм	29
Длина активной части, мм	15
Воздушный зазор, мм	0,65
Высота магнита, мм	2,2
Число витков катушки обмотки статора	44
Схема соединения обмотки	Y

Линейная ЭДС (рис. 2,а) снималась на зажимах обмотки статора при вращении ротора со скоростью  $\omega=200 \text{ с}^{-1}$ , а фазная ЭДС (рис. 2,б) определялась с помощью пробной обмотки с числом витков  $N = 11$  при вращении ротора со скоростью  $\omega=110 \text{ с}^{-1}$ .

Из представленных осциллограмм следует, что, вследствие синусоидальности ЭДС, ВДПМ данной конструкции имеет широкие возможности применения как в простых электроприводах со 120-градусной коммутацией транзисторных ключей, так и в прецизионных электроприводах с векторным управлением.

Для анализа динамических и квазиустановившихся режимов работы такого двигателя используется система уравнений, записанная в координатных осях ( $d; q$ ) [2]:

$$\begin{cases} u_d = r_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q; \\ u_q = r_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_m; \\ M_{\Sigma} = \frac{3}{2} p [i_q \Psi_m + i_d i_q (L_d - L_q)]; \\ J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\Sigma} - M_C, \end{cases} \quad (1)$$

где  $r_s$  - активное сопротивление обмотки статора;  $L_d, L_q$  - продольная и поперечная индуктивности;  $\Psi_m$  - максимальное потокосцепление обмотки статора с потоком ротора;  $\omega$  - скорость вращения ротора;  $M_{\Sigma}$  - электромагнитный момент;  $J_{\Sigma}$  - суммарный момент инерции;  $M_C$  - момент сопротивления.

Для решения системы уравнений (1) необходимо знать индуктивности  $L_d, L_q$  и потокосцепление  $\Psi_m$ , которые могут быть получены в результате решения полевой задачи. Полевая модель является достаточно точной для этих целей, т.к. позволяет учесть реальную геометрию ВДПМ, насыщение стали, характеристики постоянных магнитов. Для нахождения индуктивностей  $L_d, L_q$  были проведены полевые расчеты для двух положений ротора при МДС катушки обмотки статора  $F_s=0 \text{ А}$  и  $F_s=66 \text{ А}$ . При этом две фазы обмотки статора включались последовательно, т.е. из шести катушек задействованы четыре.

На рис. 2 показано распределение магнитного поля при ориентации ротора по оси  $d$ . Сопоставление распределения векторного магнитного потенциала на рис. 2,а ( $F_s=0 \text{ А}$ ) и рис. 2,б ( $F_s=66 \text{ А}$ ) показывает, что реакция якоря является намагничивающей, о чем свидетельствует увеличение числа магнитных силовых линий.

Максимальное потокосцепление  $\Psi_m$  обмотки статора с потоком ротора:

$$\begin{aligned} \Psi_m &= 2 \cdot n_k \cdot (\Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=0}}) = \\ &= 2 \cdot 44 \cdot (7.048 + 7.047) \cdot 10^{-5} = 0.0124 \text{ Вб} \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n_k$  - число витков катушки обмотки статора,  $\Phi_{1_{F_s=0}}, \Phi_{2_{F_s=0}}$  - магнитные потоки через зубцы статора (см. рис. 2) при МДС катушки обмотки статора  $F_s=0 \text{ А}$ .

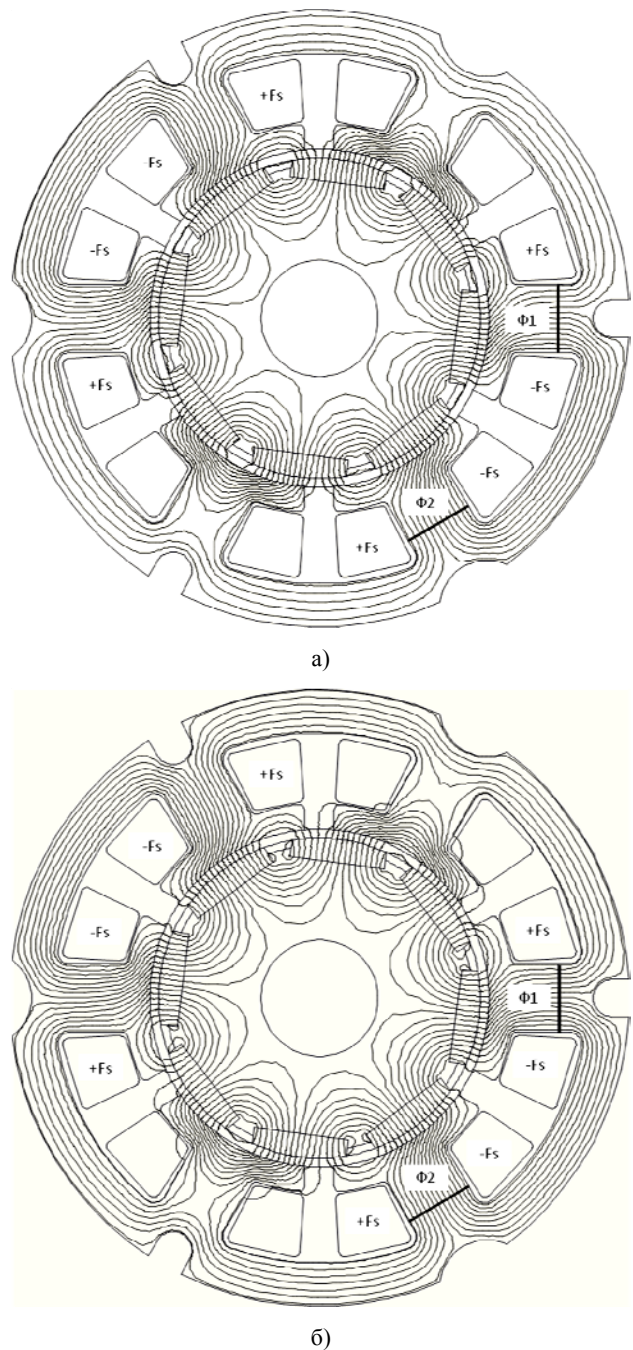


Рис. 2. Магнитное поле ВДПМ по оси  $d$  при  $F_s=0$  (а) и  $F_s=66 \text{ А}$  (б)

Индуктивность  $L_d$  по продольной оси по данным полевого расчета определяется следующим образом:

$$L_d = \frac{2 \cdot n_k^2 \cdot (\Phi_{1_{F_s=66}} - \Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=66}} - \Phi_{2_{F_s=0}})}{F_s}, \quad (3)$$

где  $\Phi_{1_{F_s=66}}, \Phi_{2_{F_s=66}}$  - магнитные потоки при  $F_s=66 \text{ А}$ .

На рис. 3 показано распределение магнитного поля при ориентации ротора по оси  $q$ . По отношению к оси  $d$  ротор смещен против часовой стрелки на механический угол  $22,5^\circ$  (90 эл. град.).

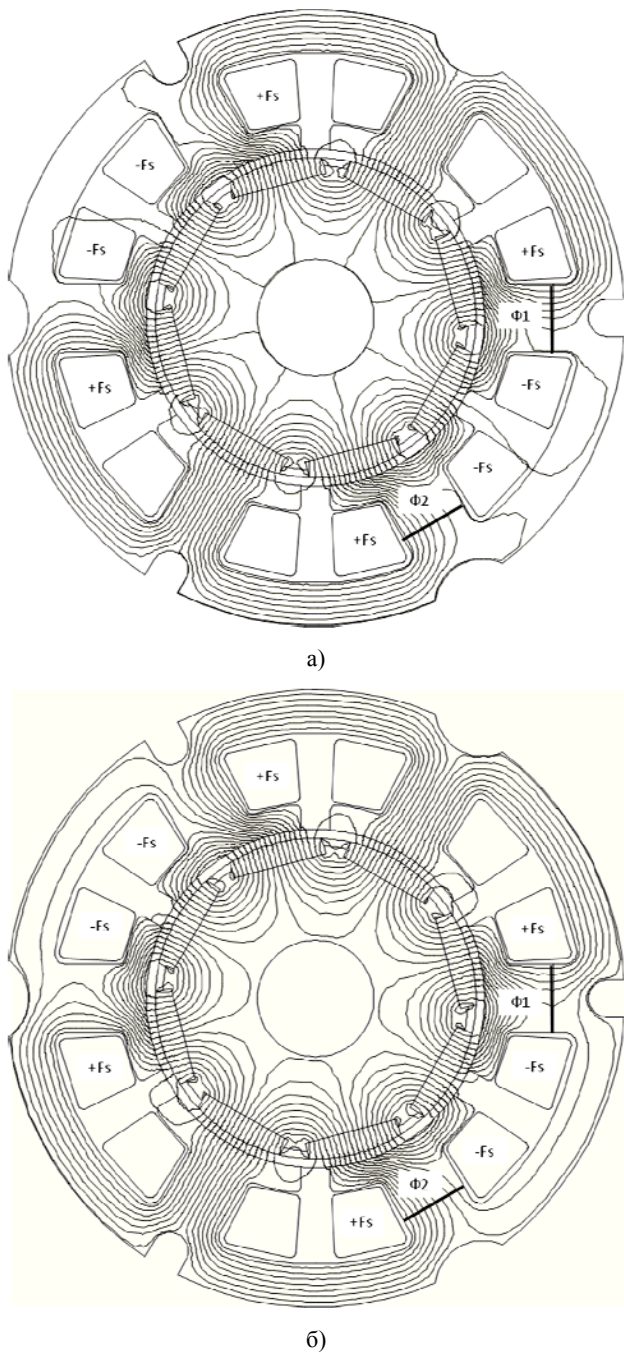


Рис. 3. Магнитное поле ВДПМ по оси  $q$  при  $F_s=0$  (а) и  $F_s=66$  А (б)

Индуктивность  $L_q$  по поперечной оси по данным полевого расчета определяется следующим образом:

$$L_q = \frac{2 \cdot n_k^2 \cdot (\Phi_{1_{F_s=66}} - \Phi_{1_{F_s=0}} + \Phi_{2_{F_s=66}} - \Phi_{2_{F_s=0}})}{F_s}, \quad (4)$$

где  $\Phi_{1_{F_s=0}}$ ,  $\Phi_{2_{F_s=0}}$  - магнитные потоки (см. рис. 3) при МДС катушки обмотки статора  $F_s=0$  А,  $\Phi_{1_{F_s=66}}$ ,  $\Phi_{2_{F_s=66}}$  - магнитные потоки при  $F_s=66$  А.

Результаты определения магнитных потоков и результаты расчета индуктивностей по (3) и (4) сведены в табл. 2.

Таблица 2

	$\Phi_{1_{F_s=0}}$	$\Phi_{2_{F_s=0}}$	$\Phi_{1_{F_s=66}}$	$\Phi_{2_{F_s=66}}$	$L$
	$В6 \cdot 10^{-5}$	$В6 \cdot 10^{-5}$	$В6 \cdot 10^{-5}$	$В6 \cdot 10^{-5}$	мГн
Ось $d$	7.048	7.047	8.459	8.458	1.656
Ось $q$	-4.084	4.092	-2.736	5.433	1.578

Данные табл. 2 подтверждают известный факт о том, что у двигателей с постоянными магнитами индуктивности по осям  $d$  и  $q$  мало отличаются [3]. В данном случае их отличие не превышает 5%.

Для идентификации значения индуктивности обмотки статора  $L_S \approx L_d \approx L_q$  был проведен эксперимент на установке, схема которой представлена на рис. 4.

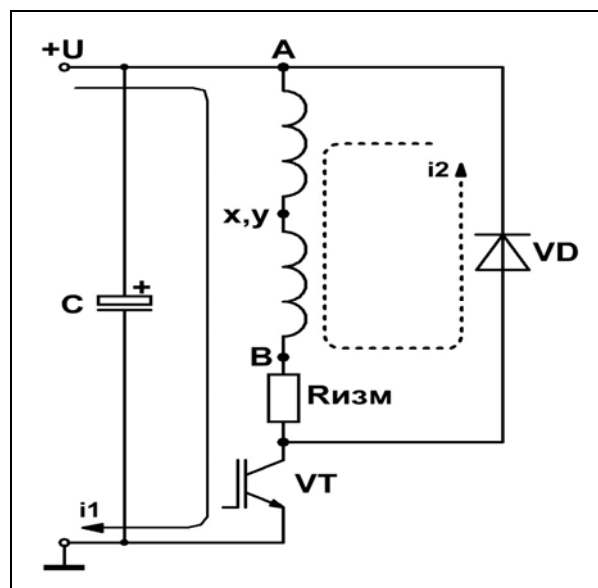


Рис. 4.

В данной схеме при подаче однополярного питания  $+U$  осуществляется импульсное регулирование тока, проходящего через две последовательно включенные фазы статора (Ах, уВ). Ротор ВДПМ при этом автоматически ориентируется по оси  $d$ . Амплитуда изменения тока составляет  $\Delta i$ , измерение тока выполняется резистором  $R_{изм}$ .

При включении транзистора VT уравнение электрического равновесия для цепи  $[+U - Ax - yB - R_{изм} - VT - \text{общий провод}]$ :

$$U = R_1 \cdot i_1 + L_S \frac{di_1}{dt}, \quad (5)$$

где  $R_1$  - активное сопротивление контура прохождения тока  $i_1$ ,  $t$  - время. В данном режиме работы схемы  $\frac{di_1}{dt} > 0$ .

При выключении транзистора VT уравнение электрического равновесия для цепи  $[Ax - yB - R_{изм} - \text{диод VD}]$ :

$$0 = R_2 \cdot i_2 + L_S \frac{di_2}{dt}, \quad (6)$$

где  $R_2$  - активное сопротивление контура прохождения

ния тока  $i_2$ . В этом режиме  $\frac{di_2}{dt} < 0$ .

График изменения тока двигателя в функции времени, построенный по результатам эксперимента, приведен на рис. 5.

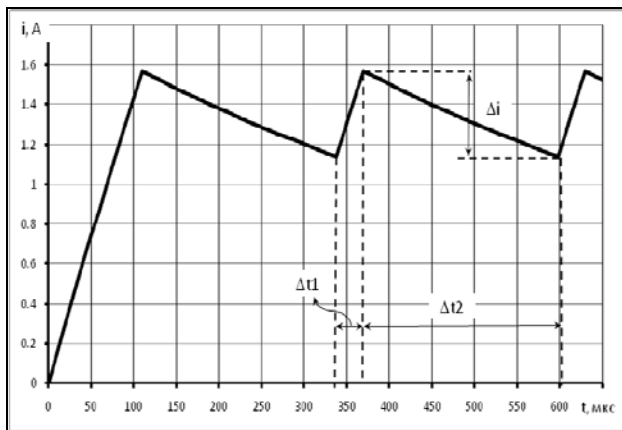


Рис. 5. График изменения тока ВДПМ

Из уравнений (5), (6) могут быть получены средние значения токов  $I_1$  и  $I_2$  за интервалы времени  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  в квазиустановившемся режиме регулирования тока:

$$I_1 = \frac{U - L_S \frac{\Delta i_1}{\Delta t_1}}{R_1}, \quad I_2 = \frac{-L_S \frac{\Delta i_2}{\Delta t_2}}{R_2}. \quad (7)$$

Исходя из того, что  $\Delta i_1 = -\Delta i_2 = \Delta i$ ,  $I_1 = I_2$  и считая, что  $R_1 \approx R_2$  индуктивность статора определяется так:

$$L_S = \frac{U}{\Delta i} \cdot \frac{\Delta t_1 \cdot \Delta t_2}{\Delta t_1 + \Delta t_2}. \quad (8)$$

По экспериментальным данным  $U = 24,1$  В,  $\Delta i = 0,43$  А,  $\Delta t_1 = 32$  мкс,  $\Delta t_2 = 228$  мкс. Тогда индуктивность по (8)  $L_S = 1,572$  мГн, что близко к расчетному значению, полученному исходя из решения полевой задачи. Здесь же отметим, что полевая задача решалась в плоской постановке, при которой вклад лобовых частей обмотки статора в общую индуктивность не учитывается. Однако, ввиду того, что в рассматриваемой конструкции ВДПМ с явно выраженными полюсами вылет лобовых частей мал, результат расчета индуктивности в плоской постановке полевой задачи получается достаточно корректным.

Для дополнительной проверки правильности идентификации индуктивности обмотки статора и ввода в расчет условия  $R_1 \approx R_2$  по уравнениям (7) определим значения активных сопротивлений контуров прохождения токов  $i_1$  и  $i_2$ . В эксперименте при регулировании ток обмотки статора изменялся в пределах от 1,14 А до 1,57 А, т.е. его среднее значение составило  $I = 1,355$  А.

Тогда по (7) сопротивление  $R_1 = 2,19$  Ом, сопротивление  $R_2 = 2,2$  Ом. В то же время собственное сопротивление обмотки статора при температуре 20 °С

составляет 1,57 Ом, а сопротивление токоизмерительного резистора в схеме по рис. 4  $R_{изм} = 0,2$  Ом. Учитывая сопротивление полупроводниковых приборов VT и VD, можно сделать вывод о достаточно хорошем соответствии расчетных значений сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  реальным значениям сопротивлений этих контуров.

На рис. 6 представлена расчетная механическая характеристика исследуемого в данной работе ВДПМ, полученная на основе решения системы уравнений (1) с учетом изложенной выше методики определения индуктивностей обмотки статора по осям  $L_d, L_q$  и потокоцепления  $\Psi_m$ . Также на рис. 6 представлена экспериментальная механическая характеристика ВДПМ. Сопоставление расчетной и экспериментальной механических характеристик позволяет сделать заключение о том, что решение полевой задачи в двухмерной постановке дает возможность с достаточной точностью определить все необходимые данные для расчета динамических режимов электропривода с явнополюсным ВДПМ.

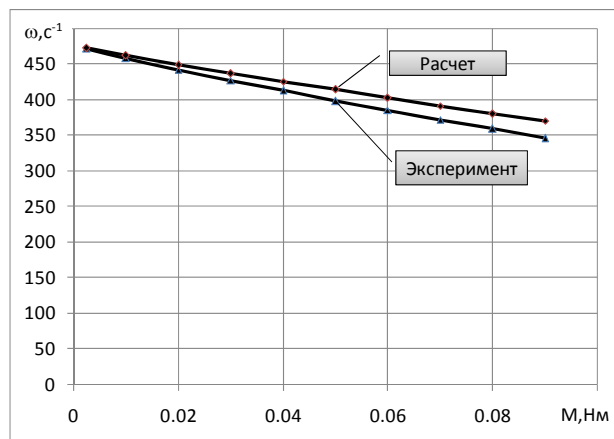


Рис. 6. Механические характеристики ВДПМ

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Калужный А.Н., Рымша В.В. Вентильные электродвигатели и электроприводы производства николаевского завода "Электротехника" // Рынок электротехники. – 2007. № 4(8). – С. 90.
- [2] Столов Л.А., Афанасьев А.Ю. Моментные двигатели постоянного тока. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 224 с.
- [3] Косулин В.Д., Михайлов Г.Б., Омельченко В.В., Путьков В.В. Вентильные электродвигатели малой мощности для промышленных роботов. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. Отд-ние, 1988. – 184 с.

Поступила 03.04.2008