

УДК 621.313

ББК 31.261

А.А. АФАНАСЬЕВ

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕНТИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ С ЗУБЦОВЫМИ МАЛОПОЛЮСНЫМИ ОБМОТКАМИ НА БАЗЕ 6ДВМ 300

Ключевые слова: зубцовые катушки, ряды Фурье, магнитодвижущие силы обмоток и магнитов, удельная магнитная проводимость, магнитные индукции, электродвижущая сила обмотки, электромагнитный момент.

Рассматриваются вентильные двигатели с зубцовыми обмотками с числами полюсов 2, 4, 6, 8, главные размеры которых соответствуют вентильному двигателю 6ДВМ 300 производства АО «Чебоксарский электроаппаратный завод». Такой подход позволяет оценить влияние числа зубцов статора на электромагнитный момент и его гармонический состав. Три соседние катушки рассматриваемых зубцовых обмоток принадлежат трём различным фазам. Анализируются магнитодвижущие силы обмоток и магнитов ротора, на основе метода удельной магнитной проводимости зазора находится распределение магнитной индукции в зазоре, электродвижущая сила обмотки статора и электромагнитный момент. Показано, что кривая магнитодвижущей силы обмотки статора по форме состоит из двух разнополюсных прямоугольников неодинаковой высоты и ширины, из-за несинусоидальности распределения источников магнитного поля и зубчатой неоднородности воздушного зазора кривые фазных электродвижущих сил обмотки статора также существенно несинусоидальны. Найдено, что с ростом числа полюсов (с 2 до 8 полюсов) обмотки статора максимум индукции в воздушном зазоре снижается с уровня 1 до 0,75 Тл, среднее значение электромагнитного момента растёт от 120 до 160 Нм, амплитуда фазной электродвижущей силы остаётся неизменной, а максимум (высота прямоугольника) магнитодвижущей силы обмотки статора снижается с 2000 до 500 А.

Введение. Зубцовые (сосредоточенные) обмотки, расположенные на каждом зубце статора, получают всё большее распространение в нашей стране [1, 4–7] и за рубежом [8, 9]. У таких обмоток число полюсов должно быть близким (но не равным) к числу зубцов статора. Разница между ними обычно не превосходит 2–5.

Возможно исполнение статора с различными вариантами чисел зубцов и полюсов: 1) $z = 3$, $2p = 2$; 2) $z = 6$, $2p = 4$; 3) $z = 9$, $2p = 6$; 4) $z = 12$, $2p = 8$; 5) $z = 15$, $2p = 10$; 6) $z = 18$, $2p = 12$ и т.д.

У каждого из этих вариантов пространственный сдвиг двух соседних зубцов в магнитном поле равен 120 эл. градусов. Следовательно, катушки трёх первых зубцов будут принадлежать фазам A , B и C . Остальные катушки будут образовывать одинаковые ветви в соответствующих фазах, которые могут соединяться последовательно или параллельно.

Начиная с четвёртого варианта ($z = 12$, $2p = 8$) возможны подварианты с другим числом полюсов: $z = 12$, $2p = 10$ [2]. Для вентильного двигателя (ВД) с $z = 18$ число полюсов может быть: 10, 14, 16 [1, 2].

Роторы для всех вариантов могут иметь наружное или «карманное» расположение магнитов. Для названного выше четвертого и последующих вариантов возможна «коллекторная» конструкция магнитов, обеспечивающая высокие уровни плотности магнитного потока в воздушном зазоре вплоть до 2 Тл.

Рассмотрим начальные (малополюсные) варианты выполнения вентиляльных двигателей применительно (для конкретики) к главным размерам 6ДВМ 300¹ – $D_i = 126$ мм; $l = 200$ мм. Насыщением магнитной цепи ВД пренебрегаем.

1. Двухполюсный ВД с тремя зубцами статора. Имеем исходные данные: $m = 3$; $D_i = 126$ мм; $D_{\text{рм}} = 122$ мм; $l = 200$ мм; $2p = 2$; $n = 3000$ об./мин; $f = \frac{pn}{60} = 50$ Гц; $\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = 197,9$ мм; $h_m = 7,3$ мм; $z = 3$; $w_k = 33$; $z_\phi = 1$ – число

пазов в одной фазе; $w = w_k z_\phi = 33$; $I = 50$ А – фазный ток.

Будем считать токи в фазах обмотки статора, формируемые преобразователем частоты, синусоидальными:

$$\begin{aligned} i_A &= \sqrt{2}I \sin \omega t; \quad i_B = \sqrt{2}I \sin(\omega t - 2\pi/3); \\ i_C &= \sqrt{2}I \sin(\omega t - 4\pi/3). \end{aligned} \quad (1)$$

Три зубца с катушками трех фаз образуют один пространственный период. Величина пространственного периода

$$2\tau = 3t_z, \quad (2)$$

где τ, t_z – полюсное и зубцовое деления, соответственно.

Разложим кривые МДС катушек в косинусные и синусные ряды Фурье

$$\left. \begin{aligned} F_A(x) &= \sum_{k=0}^{\infty} aA(k) \cos k\Omega x + bA(k) \sin k\Omega x, \\ F_B(x) &= \sum_{k=0}^{\infty} aB(k) \cos k\Omega x + bB(k) \sin k\Omega x, \\ F_C(x) &= \sum_{k=0}^{\infty} aC(k) \cos k\Omega x + bC(k) \sin k\Omega x, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\Omega = 2\pi/T_1$; $T_1 = 2\tau$;

$$\begin{aligned} aA(k) &= \frac{2}{T_1} \int_0^{t_z} w_{i_A} \cos(k\Omega x) dx; \quad bA(k) = \frac{2}{T_1} \int_0^{t_z} w_{i_A} \sin(k\Omega x) dx; \\ aB(k) &= \frac{2}{T_1} \int_{t_z}^{2t_z} w_{i_B} \cos(k\Omega x) dx; \quad bB(k) = \frac{2}{T_1} \int_{t_z}^{2t_z} w_{i_B} \sin(k\Omega x) dx; \\ aC(k) &= \frac{2}{T_1} \int_{2t_z}^{3t_z} w_{i_C} \cos(k\Omega x) dx; \quad bC(k) = \frac{2}{T_1} \int_{2t_z}^{3t_z} w_{i_C} \sin(k\Omega x) dx. \end{aligned}$$

На рис. 1 показаны кривые МДС фаз зубцовой обмотки статора, построенные по формулам (3) для времени $t = 0^2$.

Результирующая кривая МДС всей зубцовой обмотки, построенная по формуле (4) для времени $t = 0$, показана на рис. 2.

$$F(x) = F_A(x) + F_B(x) + F_C(x). \quad (4)$$

¹ Магнитоэлектрический вентиляльный двигатель 6ДВМ 300 с распределённой обмоткой статора имеет данные: $l = 0,2$ м, $2p = 4$, $\delta = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $M = 70$ Нм, $I = 67$ А.

² Все кривые, показанные на рисунках, имеют размерность в международной системе единиц.

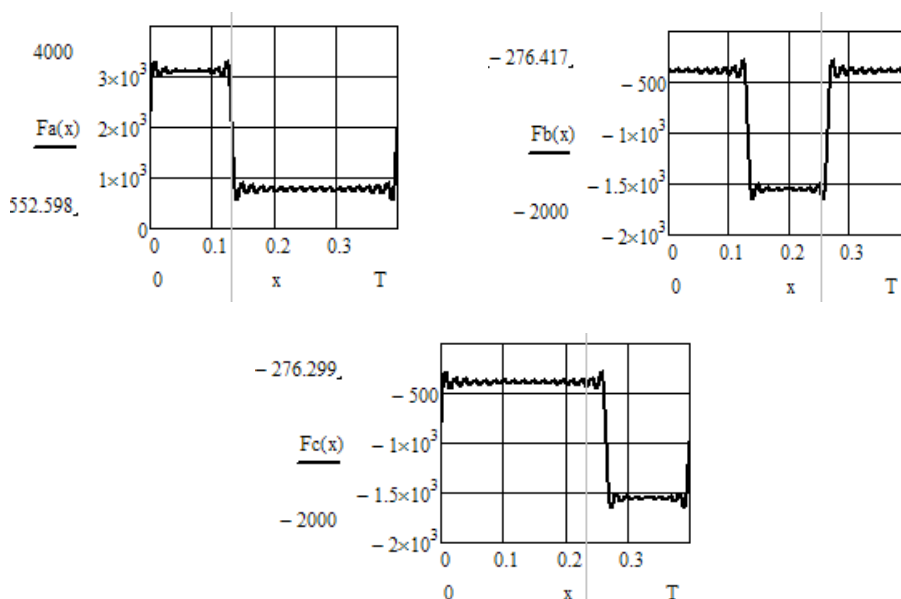


Рис. 1. Кривые МДС фаз обмотки статора

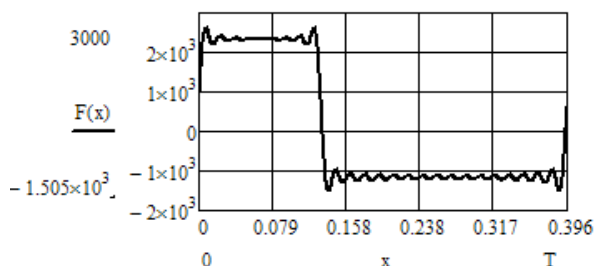


Рис. 2. Результирующая МДС обмотки статора для времени $t = 0$

Отметим, что фазные кривые и результирующая кривая МДС имеют ступенчатый характер.

Тангенциальная составляющая напряженности магнитного поля, вызванного обмоткой статора:

$$H(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \Omega \sum_{k=0}^{\infty} k \{ [bA(k) + bB(k) + bC(k)] \cos k\Omega x - [aA(k) + aB(k) + aC(k)] \sin k\Omega x \}. \quad (5)$$

МДС магнитов ротора представим рядом

$$F_p(x, \theta) = \frac{4 I_M}{\pi 2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \beta(2n-1)}{2n-1} \sin[\alpha(2n-1)(x-\theta)], \quad (6)$$

где $I_M = 2H_{CB}h_M$; $\alpha = \pi/\tau$; $\beta = \pi/18$; θ – сдвиг основных гармоник МДС обмотки статора и магнитов ротора, м.

Кривая МДС ротора, построенная по формуле (6) для $H_{CB} = 800$ кА/м и сдвинутая на половину полюсного деления относительно МДС статора, показана на рис. 3.

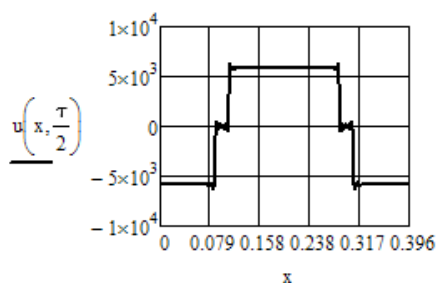


Рис. 3. Кривая МДС магнитов ротора

Пренебрегая насыщением магнитной цепи, будем определять магнитную индукцию в воздушном зазоре методом удельной магнитной проводимости [3]. Для односторонней зубчатости воздушного зазора удельная магнитная проводимость воздушного зазора

$$\Lambda_{\delta}(x) = \lambda_{\delta 0} \left[1 + \lambda_1 \cos\left(\frac{2x}{D_i} z\right) + \lambda_2 \cos\left(\frac{4x}{D_i} z\right) \right], \quad (7)$$

где $\lambda_{\delta 0} = \mu_0 / \delta$; $\delta = (\delta_0 + h_m) k_{\delta}$.

Полагая ширину зубца равной $b_z = t_z / 2$, для рассматриваемой геометрии зазора с полузакрытыми пазами статора у двигателя 6ДВМ 300 имеем [3]

$$\delta_0 = 1 \text{ мм}; \quad k_{\delta} = 1,038; \quad \lambda_1 = 0,628; \\ \lambda_2 = -0,11.$$

Магниты ротора будут вызывать в воздушном зазоре радиальную магнитную индукцию

$$B_2(x, \theta) = F_p(x, \theta) \Lambda_{\delta}(x). \quad (8)$$

По формуле (8) на рис. 4, а построена кривая для $\theta = \tau / 2$.

Аналогичным образом находится магнитная индукция, вызванная током обмотки статора:

$$B_1(x) = F(x) \Lambda_{\delta}(x). \quad (9)$$

По этой формуле на рис. 4, б построена кривая. На рис. 4, в показана также результирующая кривая магнитной индукции $B_r(x, \tau / 2)$ в воздушном зазоре.

Отметим, что результирующая кривая индукции имеет максимум, близкий к 1 Тл.

Мгновенные значения ЭДС фазы обмотки статора, наведенной результирующим радиальным потоком магнитной индукции в воздушном зазоре, и электромагнитного момента будут равны

$$\begin{aligned}
 e(t) &= -\frac{d\psi(t)}{dt} = -z_\phi w_k l \left\{ \frac{d}{dt} \int_{x(t)}^{x(t)+t_z} \hat{B}_y [x(t), h_m, t, \tau/2] dx \right\} = \\
 &= -z_\phi w_k l \left\{ \int_{x(t)}^{x(t)+t_z} \frac{\partial \hat{B}_y [x(t), h_m, t, \tau/2]}{\partial t} dx \right\} - \\
 &- z_\phi w_k l \frac{\omega}{\alpha} \left\{ \hat{B}_y [x(t) + t_z, h_m, t, \tau/2] - \hat{B}_y [x(t), h_m, t, \tau/2] \right\}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

$$M(t) = \frac{1}{\Omega} \sum_{j=1}^m e \left[t - \frac{(j-1)T}{m} \right] i \left[t - \frac{(j-1)T}{m} \right], \quad (11)$$

где t_z – зубцовое деление статора; m – число фаз.

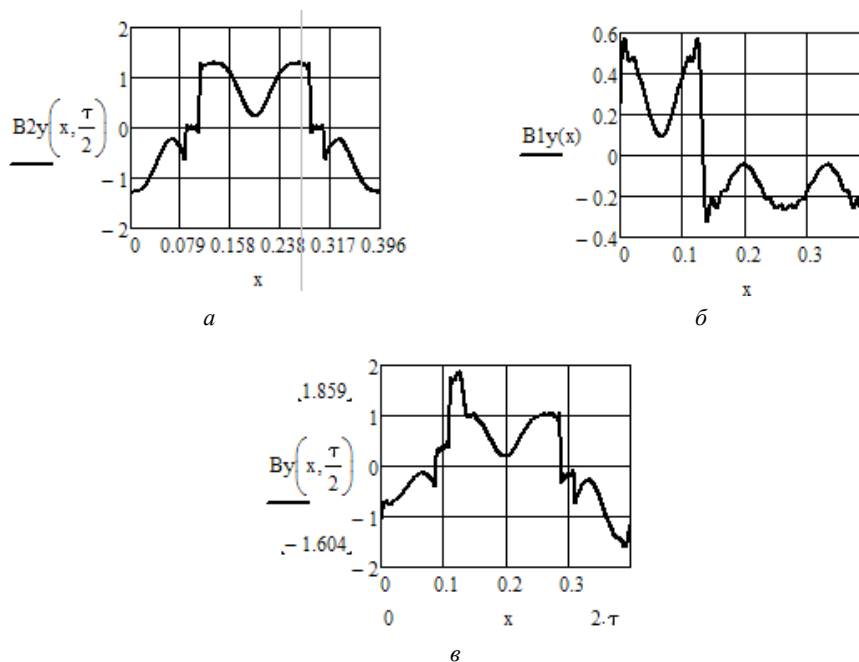


Рис. 4. Кривые магнитной индукции в воздушном зазоре, вызванные магнитами ротора (а), МДС обмотки статора (б) и обоими источниками поля (в)

Тогда для средних значений электромагнитной мощности и момента будет справедливо

$$P_{cp} = \frac{m}{T} \int_0^T e(t)i(t)dt ; M_{cp} = P_{cp}/\Omega, \quad (12)$$

где ток фазы А статора

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos \omega t. \quad (13)$$

Его нулевой фазовый сдвиг с помощью датчика положения ротора (резольвера) будет совпадать с фазовым сдвигом основной гармоники результирующей ЭДС $e(t)$ этой фазы.

На рис. 5, а показаны ЭДС и ток фазы обмотки статора, полученные по формулам (10) и (13).

Кривая электромагнитного момента, рассчитанная по формуле (11), изображена на рис. 5, б. Среднее значение этого момента, следующее из формулы (12), составило 148,4 Нм. Амплитуда пульсации момента достигает 118 Нм.

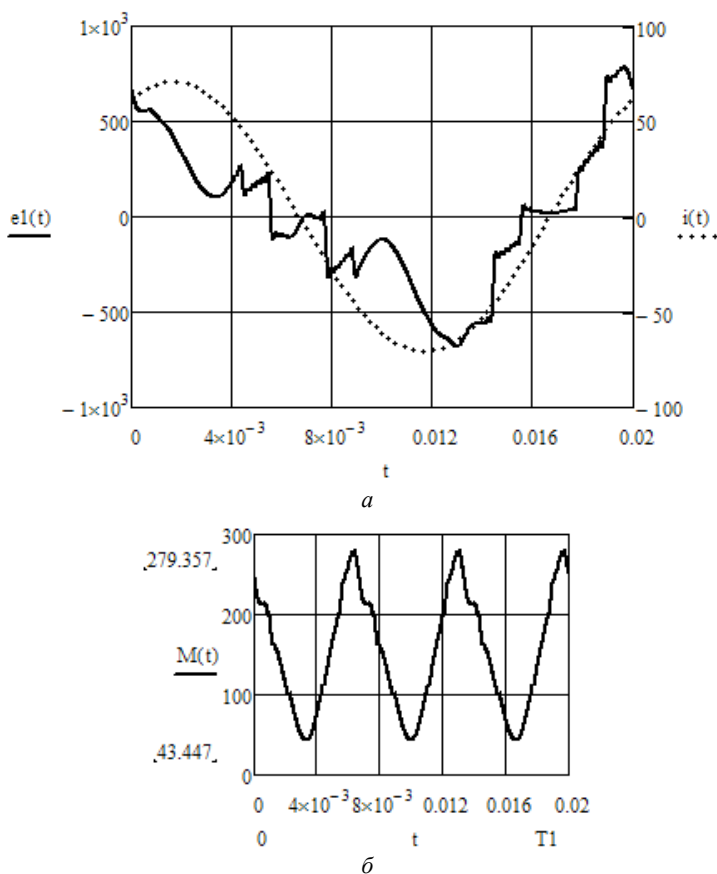


Рис. 5. Фазные ЭДС и ток обмотки статора (а) и электромагнитный момент (б)

2. Четырёхполюсный ВД с шестью зубцами статора. Имеем исходные данные: $m = 3$; $D_i = 126$ мм; $D_{рм} = 122$ мм; $l = 200$ мм; $2p = 4$; $n = 3000$ об./мин;

$$f = \frac{pn}{60} = 100 \text{ Гц}; \quad \tau = \frac{\pi D_i}{2p} = 99 \text{ мм}; \quad h_m = 7,3 \text{ мм}; \quad z = 6; \quad w_k = 16; \quad z_\phi = 2 - \text{число па-}$$

зов в одной фазе; $w = w_k z_\phi = 32$; $I = 50$ А – фазный ток.

Будем считать токи в фазах обмотки статора, формируемые преобразователем частоты, синусоидальными согласно с формулами (1).

Первые три зубца с катушками трех фаз образуют один пространственный период, следующие три зубца с аналогичными катушками всех фаз образуют второй пространственный период. Величина пространственного периода

$$2\tau = 3t_z. \quad (14)$$

Обмотка каждой фазы будет состоять из двух одинаковых ветвей, которые можно соединять последовательно или параллельно. Примем в дальнейшем вариант их последовательного соединения.

Разложим кривые МДС катушек в косинусные и синусные ряды Фурье (3).

Результирующая кривая МДС всей зубцовой обмотки, построенная по формуле (4) для времени $t = 0$, приводится на рис. 6, а.

Кривая МДС ротора, построенная по формуле (6) для $H_{св} = 800$ кА/м и сдвинутая на половину полюсного деления относительно МДС статора, показана на рис. 6, б.

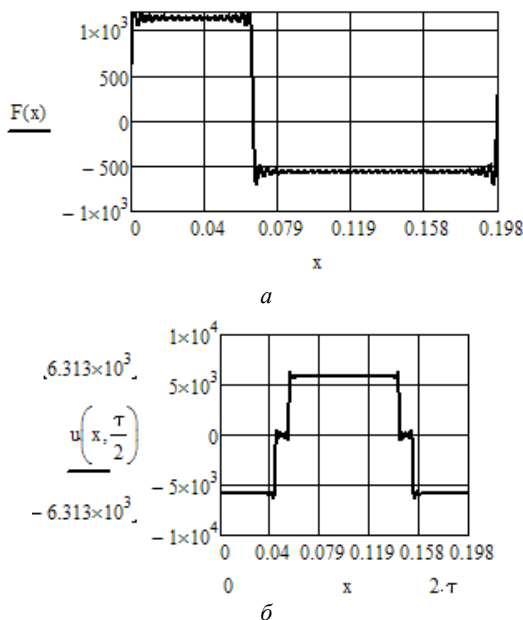


Рис. 6. Кривые МДС обмотки статора (а) и магнитов ротора (б)

Магниты ротора и МДС статора вызывают в воздушном зазоре радиальные магнитные индукции, соответственно, $B_2(x, \theta)$, $B_1(x, \theta)$ и $B_y(x, \tau/2)$, показанные на рис. 7.

Отметим, что результирующая кривая индукции имеет максимум, близкий к 1 Тл.

Кривые мгновенных значений ЭДС фазы обмотки статора, наведенной результирующим радиальным потоком магнитной индукции в воздушном зазоре, и электромагнитного момента приведены на рис. 8. Среднее значение этого момента составило 145,4 Нм.

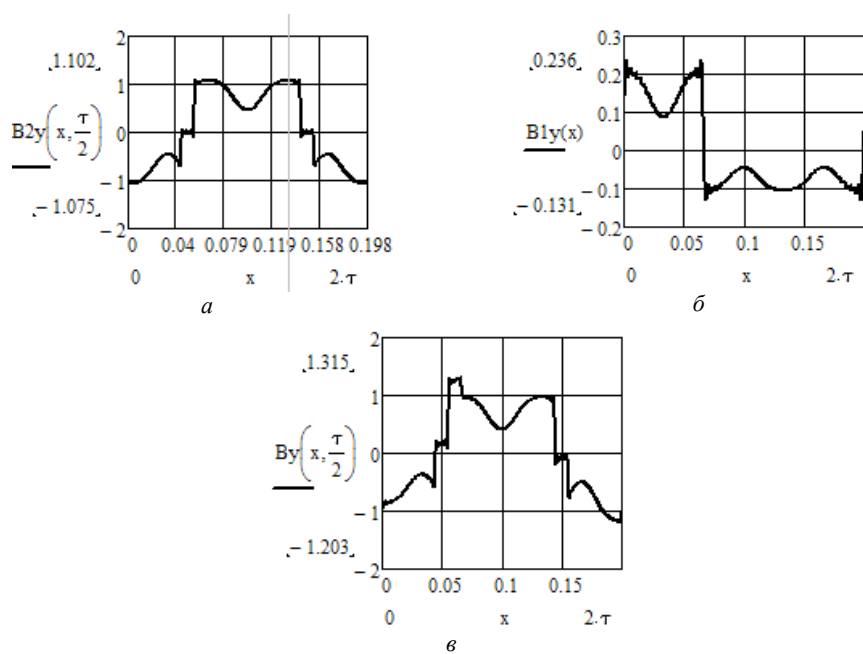


Рис. 7. Кривые магнитной индукции в воздушном зазоре, вызванные магнитами ротора (*a*), МДС обмотки статора (*b*) и обоими источниками поля (*в*)

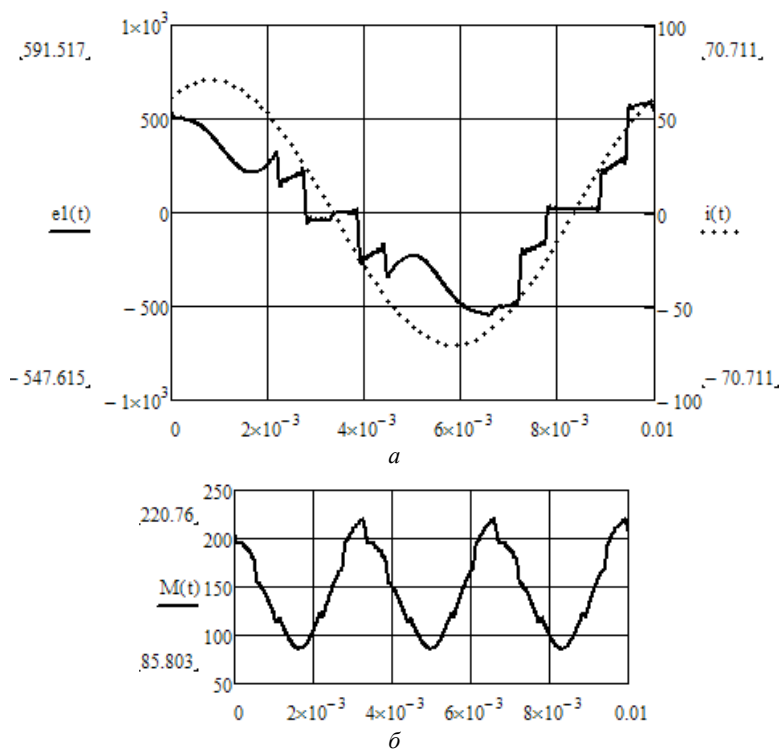


Рис. 8. Фазные ЭДС, ток обмотки статора (*a*) и электромагнитный момент (*б*)

3. Шестиполосный ВД с девятью зубцами статора. Имеем исходные данные: $m = 3$; $D_i = 126$ мм; $D_{рм} = 122$ мм; $l = 200$ мм; $2p = 6$; $n = 3000$ об./мин; $f = \frac{pn}{60} = 150$ Гц; $\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = 65,97$ мм; $h_m = 7,3$ мм; $z = 9$; $w_k = 11$; $z_\phi = 3$ – число пазов в одной фазе; $w = w_k z_\phi = 33$.

Первые три зубца с катушками трех фаз образуют один пространственный период, следующие три зубца с аналогичными катушками всех фаз образуют второй пространственный период. Величина пространственного периода

$$2\tau = 3t_z, \tag{15}$$

где τ , t_z – полюсное и зубцовое деления, соответственно.

Обмотка каждой фазы будет состоять из двух одинаковых ветвей, которые можно соединять последовательно или параллельно. Примем в дальнейшем вариант их последовательного соединения.

Кривые МДС $F(x)$ статора и $u(x, \tau/2)$ ротора показаны на рис. 9.

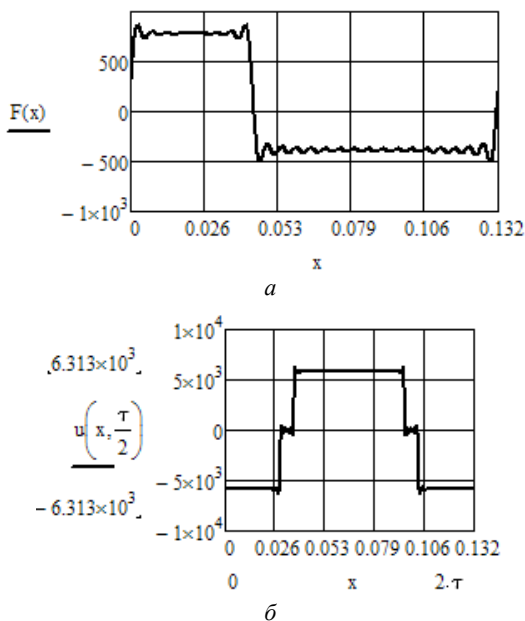


Рис. 9. Кривые МДС обмотки статора (а) и магнитов ротора (б)

Отметим, что фазные кривые и результирующая кривая МДС имеют ступенчатый характер.

Магнитные индукции в воздушном зазоре $B_2(x, \theta)$, $B_1(x, \theta)$ и $B_\phi(x, \tau/2)$, вызванные, соответственно, магнитами ротора и МДС статора, показаны на рис. 10. Отметим, что результирующая кривая индукции имеет максимум, близкий к 1 Тл.

Мгновенные значения ЭДС фазы обмотки статора, наведенной результирующим радиальным потоком магнитной индукции в воздушном зазоре, и электромагнитного момента приведены на рис. 11. Среднее значение момента составило 146,4 Нм.

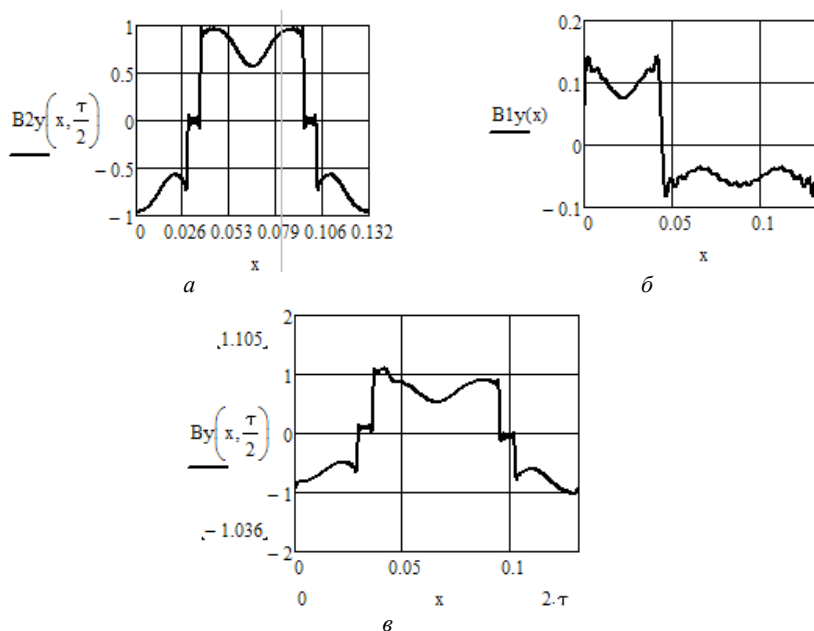


Рис. 10. Кривые магнитной индукции в воздушном зазоре, вызванные магнитами ротора (*a*), МДС обмотки статора (*b*) и обоими источниками поля (*в*)

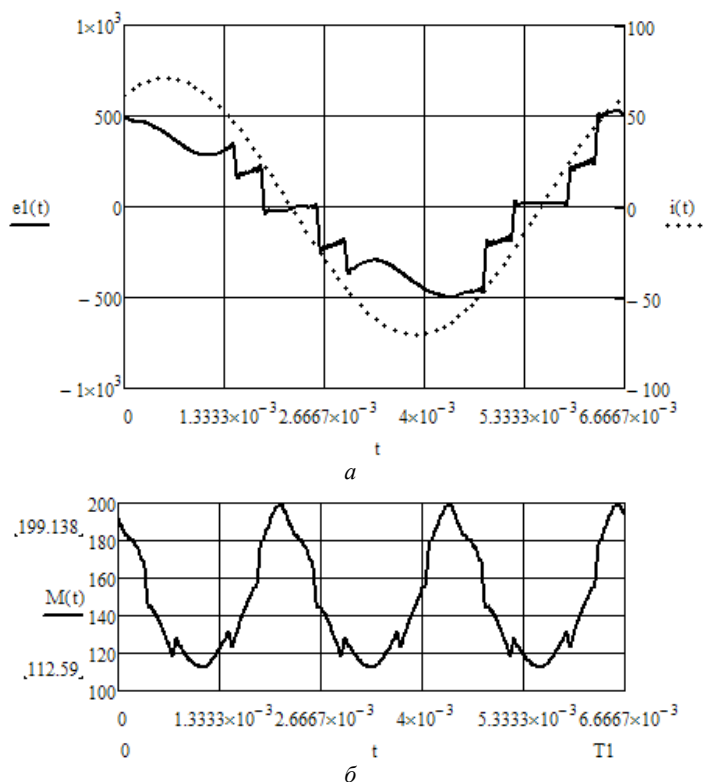


Рис. 11. Фазные ЭДС, ток обмотки статора (*a*) и электромагнитный момент (*б*)

4. Восьмиполюсный ВД с двенадцатью зубцами статора. Имеем исходные данные: $m = 3$; $D_i = 126$ мм; $D_{рм} = 122$ мм; $l = 200$ мм; $2p = 8$; $n = 3000$ об./мин; $f = \frac{pn}{60} = 200$ Гц; $\tau = \frac{\pi D_i}{2p} = 49,48$ мм; $z = 7,3$ мм; $z = 12$; $w_k = 8$; $z_\phi = 4$ – число пазов в одной фазе; $w = w_k z_\phi = 32$.

Первые три зубца с катушками трех фаз образуют один пространственный период, следующие три зубца с аналогичными катушками всех фаз образуют второй пространственный период. Величина пространственного периода

$$2\tau = 3t_z, \tag{16}$$

где τ , t_z – полюсное и зубцовое деления, соответственно.

Обмотка каждой фазы будет состоять из двух одинаковых ветвей, которые можно соединять последовательно или параллельно. Примем в дальнейшем вариант их последовательного соединения.

Кривые МДС $F(x)$ статора и $u(x, \tau/2)$ ротора показаны на рис. 12.

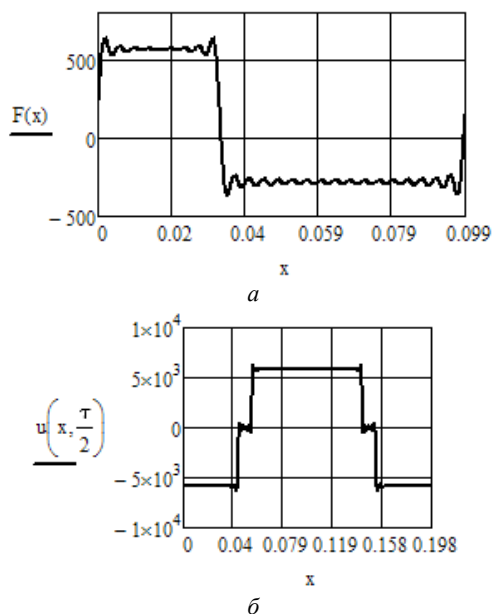


Рис. 12. Кривые магнитной индукции в воздушном зазоре, вызванные магнитами ротора (а), МДС обмотки статора (б) и обоими источниками поля (в)

Отметим, что фазные кривые и результирующая кривая МДС имеют ступенчатый характер.

Магнитные индукции в воздушном зазоре $B_2(x, \theta)$ и $B_y(x, \tau/2)$, вызванные, соответственно, магнитами ротора и МДС статора, показаны на рис. 13.

Мгновенные значения ЭДС фазы обмотки статора, наведенной результирующим радиальным потоком магнитной индукции в воздушном зазоре, и электромагнитного момента приведены на рис. 14. Среднее значение этого момента составило 161,6 Нм.

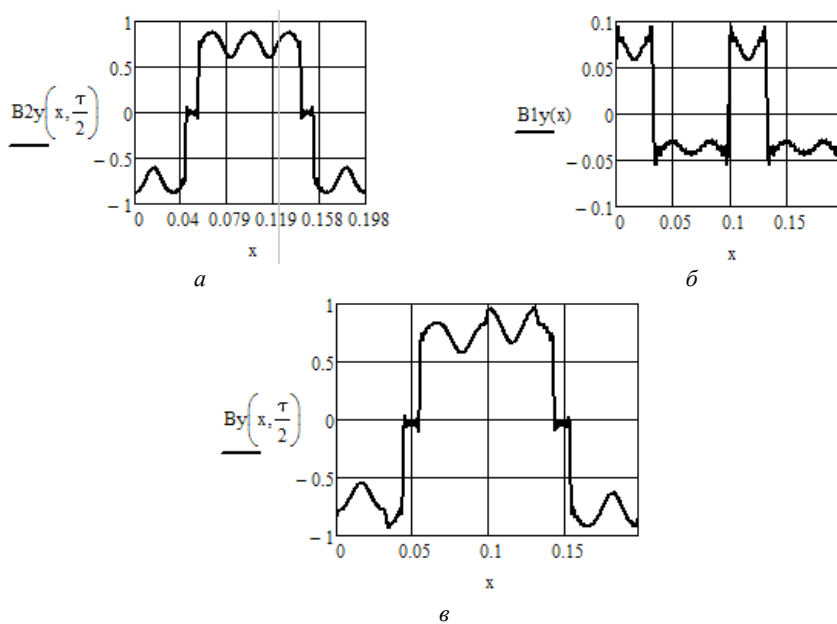


Рис. 13. Кривые магнитной индукции в воздушном зазоре, вызванные магнитами ротора (а), МДС обмотки статора (б) и обоими источниками поля (в)

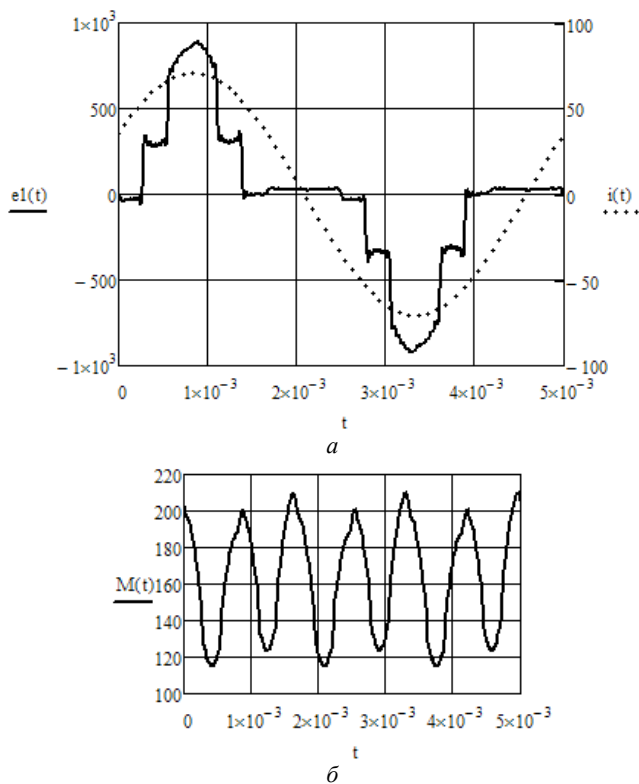


Рис. 14. Фазные ЭДС, ток обмотки статора (а) и электромагнитный момент (б)

Выводы. 1. Кривая МДС обмотки статора состоит по форме из двух разнополюсных прямоугольников неодинаковой высоты и ширины.

2. С ростом числа полюсов (с 2 до 8 полюсов) обмотки статора максимум индукции в воздушном зазоре снижается с 1 до 0,75 Тл, среднее значение электромагнитного момента растёт от 120 до 160 Нм, амплитуда фазной ЭДС остаётся неизменной, а максимум (высота прямоугольника) МДС обмотки статора снижается с 2000 до 500 А.

3. Из-за несинусоидальности распределения источников магнитного поля и зубчатой неоднородности воздушного зазора кривые фазных ЭДС обмотки статора также несинусоидальны.

Литература

1. Алексеева М.М. Машинные генераторы повышенной частоты. Л.: Энергия, 1967. 344 с.
2. Афанасьев А.А. Метод сопряжения конформных отображений в задачах электромеханики. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2011. 390 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 840 с.
4. Калужский Д.Л. Электрические машины с дискретно-распределёнными обмотками: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Екатеринбург, 1999. 40 с.
5. Сан Ю., Сеньков А.П. Сравнение массогабаритных показателей вентильных двигателей с распределённой и зубцовой обмотками статора // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2016. Вып. 3(87). С. 174–180.
6. Сеньков А.П., Лавренов С.Н., Макин П.В., Сан Ю. Особенности магнитного поля вентильных электродвигателей с зубцовым шагом обмотки статора // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. 2016. № 4. С. 79–88.
7. Шевченко А.Ф. Многополюсные синхронные машины с дробными $q < 1$ зубцовыми обмотками с возбуждением от постоянных магнитов // Электротехника. 2007. № 9. С. 3–8.
8. Islam R., Husain I. Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. *IEEE Transactions on industry application*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 152–160.
9. Jabbari A., Shakeri M. Pole shape optimization of permanent magnet synchronous motors using the reduced basis technique. *Iranian Journal & Electronic Engineering*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 48–55.

АФАНАСЬЕВ АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации и управления в технических системах, Чувашский государственный университет, Россия, Чебоксары (afan39@mail.ru).

Aleksandr A. AFANASYEV

MAGNETOELECTRIC VALVE MOTORS WITH TOOTHED MULTI-POLE WINDINGS BASED ON 6DVM 300

Key words: tooth coils, Fourier series, magnetomotive force (MMF) of windings and magnets, specific magnetic conductivity, magnetic inductions, electromotive force (EMF) of the winding, electromagnetic moment.

The paper considers valve motors with toothed windings with pole numbers 2, 4, 6, 8, the main dimensions of which correspond to the 6DVM 300 valve motor manufactured by JSC "Cheboksary electrical apparatus plant". This approach allows us to evaluate the effect of the number of stator teeth on the electromagnetic moment and its harmonic composition. The three adjacent coils of the toothed windings in question belong to three different phases. The paper analyzes the MMF of the windings and magnets of the rotor. The distribution of magnetic induction in the gap, the EMF of the stator winding and the electromagnetic

moment are found based on the method of the specific magnetic conductivity of the gap. It is shown that the MMF curve of the stator winding consists of two multipolar rectangles of unequal height and width. Due to the non-sinusoidal distribution of magnetic field sources and the jagged inhomogeneity of the air gap, the curves of the phase EMF of the stator winding are also significantly non-sinusoidal. It is found that with an increase in the number of poles (from 2 to 8 poles) of the stator winding, the maximum induction in the air gap decreases from level 1 to 0.75 Tl, the average value of the electromagnetic moment increases from 120 to 160 Nm, the amplitude of the phase EMF remains unchanged, and the maximum (height of the rectangle) of the MMF of the stator winding is reduced from 2000 to 500 A.

References

1. Alekseeva M.M. *Mashinnye generatory povyshennoi chastoty* [High Frequency Machine Generators]. Leningrad, Energiya Publ., 1967, 344 p.
2. Afanas'ev A.A. *Metod sopryazheniya konformnykh otobrazhenii v zadachakh elektromekhaniki* [Method of conjugating conformal mappings in electromechanics problems]. Cheboksary, Chuvash University Publ., 2011, 390 p.
3. Vol'dek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric Machines]. Leningrad, Energiya Publ., 1974, 840 p.
4. Kaluzhskii D.L. *Elektricheskie mashiny s diskretno-raspredeleennyimi obmotkami: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Electric machines with discretely distributed windings. Abstract of Doct. Diss.]. Ekaterinburg, 1999, 40 p.
5. San Yu., Sen'kov A.P. *Sravnienie massogabaritnykh pokazatelei ventil'nykh dvigatelei s raspredelennoi i zubtsovoi obmotkami statora* [Comparison of mass and size indicators of valve motors with distributed and toothed stator windings]. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2016, iss. 3(87), pp. 174–180.
6. Sen'kov A.P., Lavrenov S.N., Makin P.V., San Yu. *Osobennosti magnitnogo polya ventil'nykh elektrodvigatelei s zubtsovyim shagom obmotki statora* [Features of the magnetic field of valve electric motors with a toothed step of the stator winding]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2016, no. 4, pp. 79–88.
7. Shevchenko A.F. *Mnogopolyusnye sinkhronnye mashiny s drobnymi $q < 1$ zubtsovymi obmotkami s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov* [Multipolar synchronous machines with fractional $q < 1$ tooth windings with excitation from permanent magnets]. *Elektrotekhnika*, 2007, no. 9, pp. 3–8.
8. Islam R., Husain I. Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction. *IEEE Transactions on industry application*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 152–160.
9. Jabbari A., Shakeri M. Pole shape optimization of permanent magnet synchronous motors using the reduced basis technique. *Iranian Journal & Electronic Engineering*, 2010, vol. 6, no. 1, pp. 48–55.

ALEKSANDR A. AFANASYEV – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Automation and Control in Technical Systems, Chuvash State University, Russia, Cheboksary (afan39@mail.ru).

Формат цитирования: Афанасьев А.А. Магнитоэлектрические вентильные двигатели с зубцовыми малополюсными обмотками на базе 6ДВМ 300 // Вестник Чувашского университета. – 2022. – № 3. – С. 21–34. DOI: 10.47026/1810-1909-2022-3-21-34.