



УДК 621.313

А. С. Боровик, М. А. Ваганов, И. А. Пименова  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Электромагнитный момент вентильного двигателя

При определении тока обмотки статора учитывалась явнополюсная конструкция ротора, а также активное сопротивление самой обмотки статора. Выражение для электромагнитного момента двигателя было составлено при учете потокосцеплений взаимной индукции постоянных магнитов ротора с фазами обмотки статора.

### Постоянные магниты, потребляемый ток, активное сопротивление обмотки статора, фаза тока обмотки статора, потокосцепления взаимной индукции, электромагнитный момент

В вентильном двигателе с возбуждением постоянными магнитами электромагнитный момент создается в результате взаимодействия тока в фазах обмотки статора с магнитным потоком постоянных магнитов. Выражение для магнитного потока постоянных магнитов приведено в [1].

При выводе выражения для потребляемого из сети тока обмотки статора вентильного двигателя воспользуемся его векторной диаграммой, построенной для режима недовозбуждения в предположении явнополюсной конструкции ротора и представленной на рис. 1, и при дополнительном предположении включения обмотки статора двигателя не на выход полупроводникового преобразователя, а к трехфазной сети. На этой диаграмме  $\dot{U}_c$  – это вектор напряжения сети, отстающий на  $90^\circ$  от продольной оси  $d_s$  эквивалентного генератора сети. Вектор  $\dot{U}_1$  имеет такую же длину, как и вектор  $\dot{U}_c$ , но находится с ним в противофазе и представляет собой напряжение на зажимах обмотки статора. Вектор тока обмотки статора  $\dot{I}_1$ , потребляемого двигателем из сети, отстает от вектора  $\dot{U}_c$  на угол  $\varphi_1$ . Вектор ЭДС обмотки статора  $\dot{E}_1$ , индуцированной потоком возбуждения постоянных магнитов, отстает от продольной оси  $d$  ротора вентильного двигателя (ВД) на  $90^\circ$ . Угол  $\theta$  является углом нагрузки, а угол  $\psi_1$  определяет фазу тока  $\dot{I}_1$

относительно поперечной оси, по которой действует ЭДС возбуждения  $\dot{E}_1$ . Продольная  $\dot{I}_d$  и поперечная  $\dot{I}_q$  составляющие тока обмотки статора  $\dot{I}_1$  определяют падения напряжения на продольном  $x_d$  и поперечном  $x_q$  синхронных индуктивных сопротивлениях обмотки статора по продольной  $d$  и поперечной  $q$  осям соответственно. Сопротивление  $r_1$  есть активное сопротивление обмотки статора и, как правило, в выражениях для тока и электромагнитного момента оно не учитывается, поскольку существенно меньше индуктивных сопротивлений  $x_d$  и  $x_q$ . В рассматриваемом случае это сопротивление целесообразно принять во внимание, что позволит в дальнейшем сформировать математическую модель вентильного двигателя, учитывающую обмотку статора.

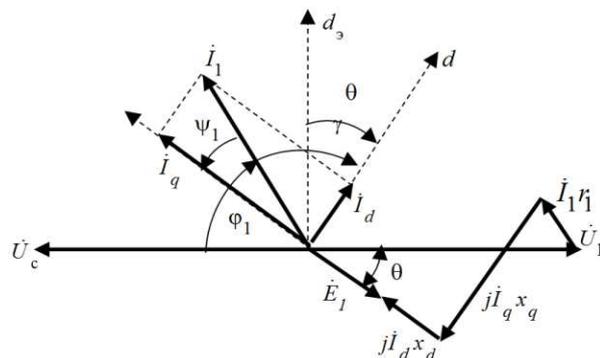


Рис. 1

Для определения составляющих тока обмотки статора  $I_d$  и  $I_q$  и действующего значения самого тока  $I_1$  составим на основании второго закона Кирхгофа с учетом векторной диаграммы на рис. 1 уравнение напряжения для одной из фаз обмотки статора  $\dot{U}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_d x_d + j \dot{I}_q x_q = \dot{E}_1$ . Проецируя данное уравнение на оси  $q$  и  $d$ , получим

$$U_1 \cos \theta - I_1 r_1 \cos \psi_1 - I_d x_d = E_1, \quad (1)$$

$$U_1 \sin \theta + I_1 r_1 \sin \psi_1 - I_q x_q = 0. \quad (2)$$

Разделим левые и правые части (1) и (2) на  $r_1$  и введем следующие обозначения:

$$x_d/r_1 = x_{d*}, \quad x_q/r_1 = x_{q*}, \quad E_1/U_1 = k_B, \quad (3)$$

где  $x_{d*}$ ,  $x_{q*}$  – относительные значения сопротивлений  $x_d$ ,  $x_q$  соответственно;  $k_B$  – коэффициент возбуждения. При учете обозначений (3) выражения (1) и (2) примут следующий вид:

$$(U_1/r_1) \cos \theta - I_1 \cos \psi_1 - I_d x_{d*} = k_B U_1/r_1, \quad (4)$$

$$(U_1/r_1) \sin \theta + I_1 \sin \psi_1 - I_q x_{q*} = 0. \quad (5)$$

И поскольку продольная  $I_d$  и поперечная  $I_q$  составляющие тока обмотки статора определяются выражениями  $I_d = I_1 \sin \psi_1$  и  $I_q = I_1 \cos \psi_1$ , то (4) и (5) примут следующий вид:

$$I_d x_{d*} + I_q = (U_1/r_1) (\cos \theta - k_B); \quad (6)$$

$$-I_d + I_q x_{q*} = (U_1/r_1) \sin \theta. \quad (7)$$

Решение (6) и (7) относительно токов  $I_d$  и  $I_q$  имеет вид

$$I_d = \frac{U_1}{r_1} \frac{(\cos \theta - k_B) x_{q*} - \sin \theta}{1 + x_{d*} x_{q*}}, \quad (8)$$

$$I_q = \frac{U_1}{r_1} \frac{x_{d*} \sin \theta + (\cos \theta - k_B)}{1 + x_{d*} x_{q*}}.$$

Конструктивная схема вентильного двигателя (его электромеханическая часть) представлена на рис. 2 (поперечное сечение), где приняты следующие обозначения: 1 – пакет стали статора; 2 – проводники обмотки статора; 3 – шихтованный ротор; 4 – постоянные магниты; 5 – воздушные каналы, предназначенные для уменьшения потоков рассеяния с боковых поверхностей постоянных магнитов.

Если иметь в виду, что магнитная проницаемость материалов постоянных магнитов сравнима с магнитной проницаемостью воздуха (вакуума), то в вентильных двигателях рассматриваемой

конструкции ротора (рис. 2) магнитные проводимости по любому диаметру ротора на пару полюсов будут практически одинаковыми. По этой причине без особой погрешности можно принять равенство синхронных индуктивных сопротивлений обмотки статора по поперечной и продольной осям, т. е.  $x_{q*} = x_{d*}$ , и тогда (7) и (8) примут следующий вид:

$$I_d = \frac{U_1}{r_1} \frac{(\cos \theta - k_B) x_{d*} - \sin \theta}{1 + x_{d*}^2}, \quad (9)$$

$$I_q = \frac{U_1}{r_1} \frac{x_{d*} \sin \theta + (\cos \theta - k_B)}{1 + x_{d*}^2}.$$

Для вывода выражения, определяющего электромагнитный момент вентильного двигателя, можно воспользоваться общим выражением электромагнитного момента, действующего в системе из  $n$  контуров (обмоток) с токами [2]:

$$m_{\text{эм}} = \frac{1}{2} \left\{ \sum_{k=1}^n i_k^2 \frac{dL_k}{d\alpha} + \sum_{k=1}^n \sum_{p=1}^n k_i p \frac{dM_{kp}}{d\alpha} \right\}, \quad (10)$$

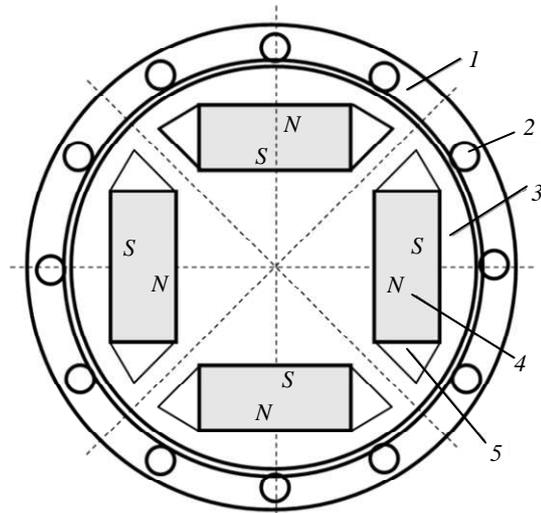


Рис. 2

где  $i_k$  и  $i_p$  – токи контуров;  $L_k$  и  $M_{pk}$  – индуктивности и взаимоиндуктивности этих контуров в предположении, что все перечисленные величины в общем случае зависят от углового положения  $\alpha$  ротора относительно, например, оси фазы  $A$  обмотки статора.

В соответствии с рис. 2 поверхность ротора цилиндрическая, и поэтому при изменении углового положения ротора как самоиндуктивности обмоток статора  $L_k$ , так и их взаимоиндуктивности  $M_{pk}$  будут оставаться неизменными, а соот-

ветствующие им производные примут нулевые значения. Как результат, в рассматриваемом случае электромагнитный момент вентильного двигателя будет определяться двойной суммой в фигурных скобках выражения (10). И применительно к рассматриваемому случаю

$$m_{\text{ЭМ}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^3 i_k i_B dM_{kB} / d\alpha. \quad (11)$$

Постоянные магниты, расположенные на роторе, создают в воздушном зазоре магнитный поток возбуждения амплитуды  $\Phi_{\delta}$ , обеспечивающий магнитную связь ротора с обмотками статора, которая реализуется через коэффициенты взаимной индукции  $M_{kB}$  между условной обмоткой ротора и фазами обмотки статора. В [2] показано, что при гармоническом распределении магнитной индукции в воздушном зазоре на поверхности расточки статора мгновенное значение коэффициента взаимной индукции между двумя обмотками  $M = M(\alpha) = M_m \cos \alpha$ , где  $M_m$  – его максимальное или амплитудное значение, соответствующее совпадению оси полюсов ротора с осью любой из фаз обмотки статора, когда  $\alpha = 0$ .

Приняв начало координат по окружности расточки статора  $\alpha = 0$  на оси фазы  $A$  и имея в виду, что оси фаз сдвинуты друг относительно друга в пространстве по окружности расточки статора на  $2\pi/3$ , получим следующие выражения для мгновенных значений коэффициентов взаимной индукции ротора с фазами обмотки статора  $M_A(\alpha) = M_m \cos \alpha$ ,  $M_B(\alpha) = M_m \cos(\alpha - 2\pi/3)$ ,  $M_C(\alpha) = M_m \cos(\alpha - 4\pi/3)$ .

Предположим, что в фазах обмотки статора проходит трехфазная симметричная система токов с действующим значением  $I_1$ , круговой частотой  $\omega$  и начальной фазой  $\gamma$  (отсчитываемой от продольной оси  $d$ ):

$$\begin{aligned} i_A &= I_1 \sqrt{2} \cos(\omega t - \gamma), \\ i_B &= I_1 \sqrt{2} \cos(\omega t - \gamma - 2\pi/3), \\ i_C &= I_1 \sqrt{2} \cos(\omega t - \gamma - 4\pi/3). \end{aligned}$$

Подставив выражения для  $M_A(\alpha)$ ,  $M_B(\alpha)$ ,  $M_C(\alpha)$  и  $i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  в (11), после преобразования вида  $\cos(\omega t - \gamma - 2\pi/3) \sin(\alpha - 2\pi/3) = (1/2) \sin(\alpha - \omega t + \gamma) + (1/2) \sin(\alpha + \omega t - \gamma - 4\pi/3)$  получим следующее выражение для мгновенного значения электромагнитного момента:

$$m_{\text{ЭМ}} = \left[ 3/(2\sqrt{2}) \right] I_1 i_B M_m \sin(\alpha - \omega t + \gamma). \quad (12)$$

В вентильном двигателе датчик положения ротора обеспечивает синхронное изменение мгновенного значения тока обмотки статора при изменении углового положения ротора таким образом, что в любой момент времени и при любом угловом положении ротора разность  $\alpha - \omega t = \text{const}$ , и в частном случае можно принять  $\alpha - \omega t = 0$ . При этом условии на основании выражения (12) можно ввести понятие среднего значения электромагнитного момента  $M_{\text{ЭМ.ср}} = \left[ 3/(2\sqrt{2}) \right] I_1 i_B M_m \sin \gamma$ . Отсюда следует, что, меняя фазу  $\gamma$  тока обмотки статора, можно управлять процессом преобразования энергии в вентильном двигателе.

Из векторной диаграммы на рис. 3 видно, что угол  $\gamma = \pi/2 - \psi_1$  и при этом условии среднее значение электромагнитного момента  $M_{\text{ЭМ.ср}} = \left[ 3/(2\sqrt{2}) \right] i_B M_m I_1 \cos \psi_1$ . Произведение  $I_1 \times \cos \psi_1 = I_q$ .

С учетом этого  $M_{\text{ЭМ.ср}} = \left[ 3/(2\sqrt{2}) \right] i_B M_m I_q$ , т. е. оказывается, что электромагнитный момент вентильного двигателя определяется не всем током обмотки статора  $I_1$ , а только его поперечной составляющей  $I_q$ , и, в частности, возрастает с увеличением  $I_q$ . Это значит, что можно повысить значение  $M_{\text{ЭМ.ср}}$  вентильного двигателя, уменьшая продольную составляющую  $I_d$  тока обмотки статора  $I_1$ . И тогда при отсутствии  $I_d$  электромагнитный момент вентильного двигателя будет иметь максимально возможное значение при прочих равных условиях.

Приняв числитель (9) равным нулю, получим условие отсутствия продольной составляющей  $I_d$  тока обмотки статора вентильного двигателя, когда ток обмотки статора будет ориентирован по его поперечной оси  $q$ .

В выражении  $M_{\text{ЭМ.ср}} = \left[ 3/(2\sqrt{2}) \right] i_B M_m I_q$  произведение  $i_B M_m$  представляет собой потокосцепление взаимной индукции условной обмотки ротора с обмоткой статора, т. е. потока возбуждения  $\Phi_{\delta}$  с фазой обмотки статора, имеющей число витков  $W_1$  и обмоточный коэффициент

$k_{обм1}$ . Тогда  $i_B M_m = W_1 k_{обм1} \Phi_\delta$ . При этом условия выражение для  $M_{эм.ср}$  примет вид

$M_{эм.ср} = \left[ 3/(2\sqrt{2}) \right] W_1 k_{обм1} \Phi_\delta I_q$ . Введем в рассмотрение коэффициент пропорциональности по моменту  $k_M = \left[ 3/(2\sqrt{2}) \right] W_1 k_{обм1}$ , и тогда

$$M_{эм.ср} = k_M \Phi_\delta I_q. \quad (13)$$

Поперечную составляющую тока обмотки статора  $I_q$  по выражению (9) с учетом обозначения  $F_{Iq} = [x_{d*} \sin \theta + (\cos \theta - k_B)] / (1 + x_{d*}^2)$  запишем в следующей форме

$$I_q = (U_1/r_1) F_{Iq}. \quad (14)$$

Действующее значение ЭДС возбуждения, индуцированной в фазе обмотки статора потоком возбуждения постоянных магнитов  $E_1 = \pi\sqrt{2} \times f_1 W_1 k_{обм1} \Phi_\delta$  или, вводя в рассмотрение угловую скорость вращения ротора  $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ , получим  $E_1 = k_E \Phi_\delta \omega_1$ , где  $k_E = W_1 k_{обм1} p/\sqrt{2}$  представляет собой коэффициент пропорциональности по ЭДС.

Введем в рассмотрение частоту вращения  $\omega_1$  идеального холостого хода вентильного двигателя в предположении, что ЭДС возбуждения обмотки статора  $E_{10}$  при скорости вращения  $\omega_0$  равна номинальному значению напряжения  $U_{1н}$ , тогда  $\omega_0 = U_1/(k_E \Phi_\delta)$ . Из выражения для  $\omega_0$  получим

$$\Phi_\delta = U_1/(k_E \omega_0). \quad (15)$$

Подставив (15) в (13) с учетом (14), будем иметь

$$M_{эм.ср} = k_M \left[ U_1^2 / (k_E \eta \omega_0) \right] F_{Iq}. \quad (16)$$

Пусковой ток  $I_{1п}$  вентильного двигателя определяется только активным сопротивлением обмотки статора, так как при неподвижном роторе ВД на зажимах обмотки статора действует постоянное напряжение нулевой частоты, следовательно, индуктивное сопротивление обмотки статора можно принять равным нулю, и тогда на основании закона Ома  $I_{1п} = U_1/r_1$ . С учетом полученного соотношения и (15) преобразуем первые два сомножителя в (16):

$$k_M \left[ U_1^2 / (k_E \eta \omega_0) \right] = k_M I_{1п} \Phi_\delta k_E \omega_0 / (k_E \omega_0) = k_M I_{1п} \Phi_\delta = M_\Pi, \quad (17)$$

где  $M_\Pi = k_M I_{1п} \Phi_\delta$  представляет собой пусковой момент вентильного двигателя.

Подставив (17) в (16), получим

$$M_{эм.ср} = M_\Pi F_{Iq}. \quad (18)$$

В ВД пусковой момент – максимально возможный, поэтому его можно принять за базовый момент и относительно него ввести понятие электромагнитного момента  $M_*$ . ВД в относительных единицах, а именно  $M_* = M_{эм.ср}/M_\Pi$ . Отсюда  $M_{эм.ср} = M_\Pi M_*$ . Тогда при учете (18) получим  $M_* = F_{Iq}$ .

В результате оказывается, что электромагнитный момент ВД в относительных единицах численно равен функции  $F_{Iq}$ , определяющей поперечную составляющую тока статора данного двигателя.

При учете обозначения для  $F_{Iq}$  получим следующее выражение для электромагнитного момента ВД в относительных единицах

$$M_* = [x_{d*} \sin \theta + (\cos \theta - k_B)] / (1 + x_{d*}^2).$$

Обозначим через  $L_d$  индуктивность обмотки статора по продольной оси с учетом потоков рассеяния этой обмотки, и тогда синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси  $x_d = 2\pi f_1 L_d$ , т. е.  $x_d$  зависит от частоты  $f_1$ , а значит, от угловой скорости вращения ротора вентильного двигателя  $\omega_2 = 2\pi f_1/p$ . Обозначим через  $x_{d0}$  синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора, соответствующее угловой скорости вращения холостого хода  $\omega_0$ , т. е.  $x_{d0} = L_d \omega_0 p$ . Приняв за базу скорость  $\omega_0$  как максимальную для вентильного двигателя, введем понятие относительной скорости вращения  $\omega_*$  его ротора по выражению  $\omega_* = \omega_2/\omega_0$ . При этих условиях оказывается, что относительное значение  $x_*$  синхронного индуктивного сопротивления при некоторой угловой скорости вращения  $\omega$  определяется выражением  $x_* = x_d/x_{d0} = x_{d*}/x_{d0*} = \omega_*$ , т. е. значения  $x_*$  и  $\omega_*$  численно равны.

Коэффициент возбуждения  $k_B = E_1/U_1$ , и так как  $E_1 = k_E \Phi_\delta \omega_1$  и в соответствии с (15) напряжение пропорционально скорости вращения, то  $k_B = \omega_1/\omega_0 = \omega_*$ . Таким образом, в ВД коэффици-

циент возбуждения  $k_B$  численно равен его относительной скорости вращения  $\omega_*$ .

Имея в виду  $x_{d0*} = x_{d0*} \omega_*$  и  $k_B = \omega_*$ , преобразуем выражение

$$M_* = [x_{d0*} \omega_* \sin \theta + (\cos \theta - \omega_*)] / (1 + x_{d0*}^2 \omega_*^2), \quad (19)$$

определяющее механическую характеристику вентильного двигателя.

В большинстве случаев вентильные двигатели работают с переменной скоростью вращения и являются реверсивными, и поэтому для получения симметричных характеристик при обоих направлениях вращения вентильного двигателя целесообразно принять угол  $\theta = 0$ . При этом условии на основании (19) получим следующее окончательное выражение для механической характеристики вентильного двигателя в относительных единицах в виде

$$M_* = (1 - \omega_*) / (1 + x_{d0*}^2 \omega_*^2). \quad (20)$$

На рис. 3 в соответствии с выражением (20) представлены механические характеристики ВД в виде кривых 1–4, построенных для нескольких значений параметра  $x_{d0*} = 0, 1, 2, 3$  соответственно.

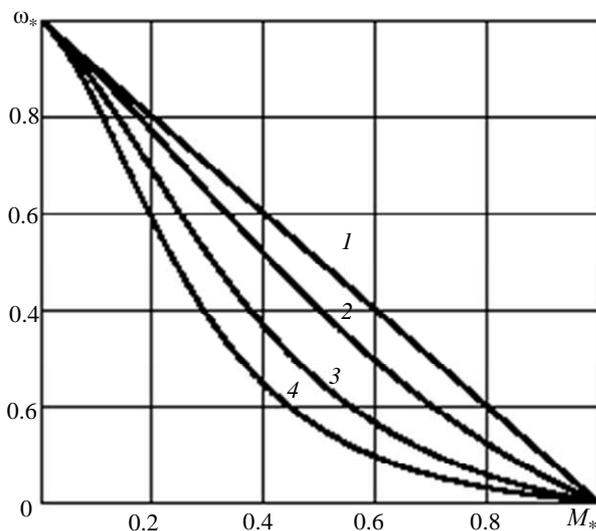


Рис. 3

Видно, что в идеальном случае, когда отсутствует синхронное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси ВД, т. е.  $x_{d0*} = 0$ , механическая характеристика ВД (прямая 1) оказывается линейной, как в двигателе постоянного тока с параллельным или независимым возбуждением.

Следовательно, действительно полупроводниковый преобразователь частоты и напряжения, через который обмотка статора ВД подключена к сети и получает питание и который управляется с помощью датчика положения ротора, эквивалентен по своему функциональному назначению щеточно-коллекторному блоку в двигателе постоянного тока.

Учет параметра  $x_{d0*}$  вызывает искажение формы механической характеристики ВД и увеличение  $x_{d0*}$  сопровождается возрастанием отклонения этой механической характеристики от линейной зависимости  $I$  (рис. 3, кривые 2, 3, 4).

Пусковой момент ВД определяется выражением  $M_{п} = k_M I_{1п} \Phi_{\delta}$ , и поскольку пусковой ток этого двигателя  $I_{1п} = U_1 / r_1$ , то, следовательно,  $M_{п} = k_M \Phi_{\delta} U_1 / r_1$ , т. е. пусковой момент ВД пропорционален напряжению  $U_1$  на зажимах обмотки статора. С другой стороны, скорость вращения холостого хода ВД  $\omega_0 = U_1 / (k_E \Phi_{\delta})$ , т. е. как и пусковой момент, пропорциональна напряжению  $U_1$ . Это значит, что изменение значения напряжения  $U_1$  будет сопровождаться перемещением механической характеристики ВД. Изменение частоты вверх или вниз относительно исходной с сохранением ее наклона — как и в двигателях постоянного тока параллельного возбуждения.

Изменение частоты  $f_1$  питающего напряжения при сохранении его действующего значения приведет к изменению скорости холостого хода  $\omega_0 = 2\pi f_1 / p$ , что будет иметь своим следствием изменение рабочей скорости вращения ВД, но так как при этом пусковой момент двигателя сохранится, то изменится наклон механической характеристики ВД. Аналогом этого способа регулирования скорости вращения ВД в двигателе постоянного тока параллельного возбуждения служит изменение тока возбуждения.

Основные результаты данной работы заключаются в следующих положениях:

1. Получено выражение для электромагнитного момента вентильного двигателя при произвольном значении угла коммутации  $\theta$ , а также и для частного случая  $\theta = 0$ , обеспечивающего симметрию механических характеристик реверсивных ВД.
2. Использование системы относительных единиц, в которой в качестве базовых значений выбраны пусковой момент ВД и максимальная

скорость вращения ротора, соответствующая его холостому ходу, дало возможность записать полученное выражение для электромагнитного момента в компактной форме за счет применения системы относительных единиц, удобной для последующего анализа, с сохранением физического смысла входящих в него коэффициентов.

3. Установлено, что основной и единственной причиной нелинейности механических характеристик вентильного двигателя при сделанных ранее допущениях служит синхронное индуктив-

ное сопротивление обмотки статора по продольной оси, увеличение которого сопровождается возрастанием нелинейности.

4. Скорость вращения ВД можно регулировать изменением действующего значения напряжения на зажимах обмотки статора или изменением частоты этого напряжения.

5. По своим регулировочным свойствам ВД подобен двигателю постоянного тока параллельного возбуждения, но имеет более высокую надежность из-за отсутствия щеточно-коллекторного узла.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов М. А., Гарчук А. А. Магнитная индукция в воздушном зазоре вентильного двигателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2016. № 8. С. 68–74.

2. Ваганов М. А. Электромагнитные силы и моменты в электромеханике. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. 94 с.

A. S. Borovik, M. A. Vaganov, I. A. Pimenova  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### ELECTROMAGNETIC TORQUE OF THE BLDC MOTOR

*When determining the stator winding current account of the salient pole design of the rotor, and the resistance of the winding of the stator. The expression for the electromagnetic torque has been compiled with due account of photocopy of mutual induction of the permanent magnets of the rotor with phase windings of the stator.*

**Permanent magnets, power consumption, the active resistance of the stator winding, the phase current of the stator winding, flux of mutual induction, electromagnetic torque**

УДК 621.313

М. А. Ваганов, Г. Д. Баранов  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Асинхронный торцевой двигатель с модифицированной геометрией зубцовой зоны статора

*Модифицированная зубцовая зона статора дает возможность упростить выбор магнитных индукций на участках магнитной системы при условии ограниченных значений плотности тока в проводниках обмотки статора. При этом дополнительно оказывается, что оптимизируются не только индукции на участках магнитной системы, но и продольно-поперечная геометрия самого двигателя.*

**Электромагнитный момент, оптимальная длина пакета стали, магнитная индукция в воздушном зазоре, наружный диаметр пакета стали, модифицированная геометрия, магнитная индукция в зубцах статора, максимум магнитного потока**

По аналогии с обычными асинхронными двигателями традиционного цилиндрического исполнения [1] в [2] была разработана модель торцевого

асинхронного двигателя, основу которой составляет итоговое выражение  $M_{эм} = k_F F_M * L^5 F S_H$ . В это выражение входит ряд сомножителей, среди ко-