



УДК 621.313

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

## Математическая модель оптимальной продольно-поперечной геометрии вентильного двигателя

*Сформирована математическая модель вентильного двигателя, на основании которой могут быть получены аналитическим путем оптимальные значения относительного диаметра расточки статора, а также магнитной индукции в воздушном зазоре, обеспечивающие наилучшее использование материалов в объеме активного ядра двигателя относительно его электромагнитного момента. Для удобства анализа в общем виде вводится система относительных единиц для линейных размеров. В качестве базового размера принимается наружный диаметр пакета стали статора. В представленной математической модели главным является функциональный сомножитель, в котором содержится вся информация о связях между физическими величинами и геометрическими размерами, задействованными в процессе преобразования энергии в вентильном двигателе. Математическая модель дает возможность оценивать влияние независимых переменных как на основные размеры, так и на технико-экономические показатели вентильного двигателя в целом*

**Относительный диаметр расточки статора, относительная длина пакета стали статора, магнитная индукция в воздушном зазоре, коэффициент пропорциональности площади паза, электромагнитный момент, функциональный сомножитель, параметрический сомножитель**

Вентильный двигатель (ВД) содержит в себе в качестве функциональных элементов электромеханическую часть, обеспечивающую непосредственное преобразование электрической энергии в механическую, полупроводниковый преобразователь питающего напряжения в синусоидальное напряжение регулируемой частоты на зажимах обмотки статора, датчик положения ротора, вырабатывающий сигнал на включение очередной фазы обмотки статора, и системы управления, обеспечивающей связь перечисленных элементов в единый комплекс и управление процессом преобразования подводимой от источника электрической энергии в механическую энергию на его валу.

В предлагаемой статье рассматривается лишь только электромеханическая часть ВД, т. е. непосредственный преобразователь энергии, определяющий его основные потребительские свойства или качества, к которым в первую очередь относятся его масса и КПД. Отсюда возникает задача необходимости разработки некоторой математи-

ческой модели, которая бы обеспечивала наилучшее использование активных материалов ВД относительно его электромагнитного момента. Желательно, чтобы разработанная математическая модель имела единственное решение, т. е. исключала появление множества вариантов и необходимость выбора наилучшего из них. Теоретические основы существования такой модели рассмотрены, например, в [1].

В качестве исходного при составлении математической модели возьмем выражение для электромагнитного момента ВД из [2], которое имеет следующий вид:

$$M_{\text{эм}} = \frac{m_1 U_1}{\eta_1} \frac{w_1 k_{\text{об1}} \Phi_{\delta p}}{2\sqrt{2}} F_{Iq}, \quad (1)$$

где действующее значение фазного напряжения  $U_1$  ВД можно выразить через ЭДС вращения  $E_1$ , индуцированную в фазе обмотки статора потоком возбуждения  $\Phi_{\delta}$  и коэффициент  $c_1$ , учитываю-

щий падение напряжения в фазе обмотки статора, а именно  $U_1 = c_1 E_1 = c_1 \pi \sqrt{2} \cdot f_1 W_1 k_{o\delta 1} \Phi_{\delta}$ .

Активное сопротивление обмотки статора из [1] определяется выражением

$$r_1 = \frac{2W_1 \left( l_1 + 2l_{B1} + \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p} \right) k_{\theta 1}}{\gamma_1 q_{a1}}.$$

Подставив выражения для  $U_1$  и  $r_1$  в (1), получим после преобразований

$$M_{эм} = \frac{2m_1 W_1 q_{a1}}{\left( l_1 + 2l_{B1} + \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p} \right)} \times \frac{c_1 \pi f_1 \gamma_1 k_{o\delta 1}^2 P \Phi_{\delta}^2 F_1 q}{8k_{\theta 1}}. \quad (2)$$

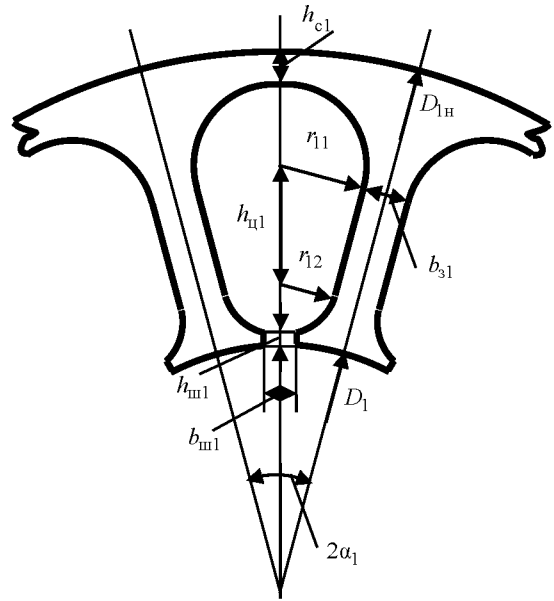
Имея в виду, что величина  $q_{a1}$  характеризует сечение проводника обмотки статора без учета его изоляции, тогда произведение  $2m_1 W_1 q_{a1}$  в числителе (2) будет представлять собой полное сечение меди обмотки статора ВД. Обозначим через  $k_{r1}$  коэффициент заполнения паза статора проводом без изоляции. При данном условии дробь  $2m_1 W_1 q_{a1} / k_{r1}$  будет характеризовать полную площадь пазов статора  $Q_{п1}$  и, следовательно, получим  $Q_{п1} = 2m_1 W_1 q_{a1} / k_{r1}$ . Отсюда имеем  $2m_1 W_1 q_{a1} = Q_{п1} k_{r1}$ . С учетом этого выражение (2) для электромагнитного момента ВД примет следующий вид:

$$M_{эм} = \frac{k_{r1} Q_{п1}}{\left( l_1 + 2l_{B1} + \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p} \right)} \times \frac{c_1 \pi f_1 \gamma_1 k_{o\delta 1}^2 P \Phi_{\delta}^2 F_1 q}{8k_{\theta 1}}. \quad (3)$$

В ВД небольшой мощности для изготовления обмотки статора в большинстве случаев используется медный обмоточный провод кругового сечения и катушки обмотки статора, выполненные из этого провода, укладываются в пазы овальной или трапецидальной формы.

Составим выражение, определяющее площадь овального паза статора (выражения для площадей пазов статора другой формы представлены в [1]). Овальный паз статора изображен на рисунке, где приняты следующие обозначения:

$D_1$  – диаметр расточки статора;  $D_{1н}$  – наружный диаметр пакета стали статора;  $r_{11}$  и  $r_{12}$  – радиусы меньшей и большей полуокружностей паза соответственно;  $h_{п1}$  – расстояние между центрами этих полуокружностей;  $h_{c1}$  – высота сердечника статора;  $b_{31}$  – ширина зубца статора;  $b_{ш1}$  и  $h_{ш1}$  – ширина и высота шлица паза соответственно;  $2\alpha_1 = 2\pi/Z_1$  – центральный угол, соответствующий зубцовому делению статора.



Площадь овального паза статора  $Q'_{п1}$  в соответствии с рисунком складывается из площадей двух секторов с радиусами  $r_{11}$  и  $r_{12}$  и с центральными углами  $\pi + 2\alpha_1$  и  $\pi - 2\alpha_1$  соответственно и площадей двух одинаковых неравнобоких трапеций с основаниями  $r_{11}$  и  $r_{12}$  и высотой равной  $h_{п1} \cos \alpha_1$ . С учетом этого получим

$$Q'_{п1} = \frac{1}{2} (\pi + 2\alpha_1) r_{11}^2 + \frac{1}{2} (\pi - 2\alpha_1) r_{12}^2 + (r_{11} + r_{12}) h_{п1} \cos \alpha_1. \quad (4)$$

На основании рисунка составим два соотношения:

$$\frac{1}{2} D_{1н} - h_{c1} - r_{11} = \left( r_{11} + \frac{1}{2} b_{31} \right) / \sin \alpha_1,$$

$$\left( \frac{1}{2} D_1 + h_{ш1} + r_{12} \right) \sin \alpha_1 = r_{12} + \frac{1}{2} b_{31},$$

из которых получим выражения, определяющие радиусы верхней и нижней полуокружностей овального паза

$$r_{11} = \left[ \left( \frac{1}{2} D_{1H} - h_{c1} \right) \sin \alpha_1 - \frac{1}{2} b_{31} \right] / (1 + \sin \alpha_1),$$

$$r_{12} = \left[ \left( \frac{1}{2} D_1 - h_{ш1} \right) \sin \alpha_1 - \frac{1}{2} b_{31} \right] / (1 - \sin \alpha_1).$$

Расстояние между центрами полуокружностей на основании рисунка  $h_{ш1} = (r_{11} - r_{12}) / \sin \alpha_1$ .

Подставив  $h_{ш1}$  в (4), после преобразований получим

$$Q'_{п1} = \frac{1}{2} (\pi - 2\alpha_1) r_{11}^2 + \frac{1}{2} (\pi + 2\alpha_1) r_{12}^2 +$$

$$+ (r_{11}^2 - r_{12}^2) \operatorname{ctg} \alpha_1 = r_{11}^2 \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 + \frac{2}{Z_1} \right) + \operatorname{ctg} \frac{\pi}{Z_1} \right] +$$

$$+ r_{12}^2 \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{2}{Z_1} \right) - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{Z_1} \right].$$

В выражения для радиусов  $r_{11}$  и  $r_{12}$  входят минимальная ширина зубца статора  $b_{31}$  и минимальная высота сердечника статора  $h_{c1}$ , для определения которых запишем выражения для магнитного потока зубцового деления  $t_1$  статора  $\Phi_{t1} = B_{\delta} t_1 l_1$  и магнитного потока, соответствующего полюсному делению  $\tau_1$  статора  $\Phi_{\delta} = 2 B_{\delta} \tau_1 l_1 / \pi$ , где  $l_1$  – длина пакета стали статора. С другой стороны выражения для указанных магнитных потоков можно записать через максимальные значения магнитных индукций  $B_{31}$  и  $B_{c1}$  на этих участках магнитной цепи асинхронного двигателя, а именно:  $\Phi_{t1} = B_{31} b_{31} l_1 k_{c1}$  и  $\Phi_{\delta} = 2 B_{c1} h_{c1} l_1 k_{c1}$ . При этом предполагается, что весь магнитный поток  $\Phi_{t1}$ , приходящийся на зубцовое деление, в зубцовой зоне проходит через зубец полностью, т. е. без ответвления в прилегающие к зубцу пазы, и точно так же нет потока магнитного рассеяния в сердечнике статора в окружающее внешнее пространство. Имея в виду, что зубцовое деление статора при числе пазов статора  $Z_1$  определяется выражением  $t_1 = \pi D_1 / Z_1$ , а полюсный шаг статора  $\tau_1 = \pi D_1 / 2p$ , получим следующие выражения для минимальной ширины зубца статора и минимальной высоты сердечника статора:  $b_{31} = \frac{\pi D_1}{Z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}}$ ,  $h_{c1} = \frac{D_1}{2p} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{c1}}$  соответственно.

После подстановки этих выражений в  $r_{11}$  и  $r_{12}$  получим следующие окончательные выражения для радиусов верхней и нижней полуокружностей овального паза статора

$$r_{11} = \left[ \left( \frac{1}{2} D_{1H} - \frac{D_1}{2p} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{c1}} \right) \sin \alpha_1 - \frac{1}{2} \frac{\pi D_1}{Z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}} \right] / (1 + \sin \alpha_1) =$$

$$= \frac{1}{2} D_1 \left[ \left( \frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_{\delta}}{p k_{c1} B_{c1}} \right) \sin \frac{\pi}{Z_1} - \frac{\pi}{Z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}} \right] / (1 + \sin \alpha_1), \quad (5)$$

$$r_{12} = \left[ \left( \frac{1}{2} D_{1H} - h_{ш1} \right) \sin \alpha_1 - \frac{1}{2} \frac{\pi D_1}{Z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}} \right] / (1 - \sin \alpha_1) =$$

$$= \frac{1}{2} D_1 \left[ (1 - h_{ш1*}) \sin \frac{\pi}{Z_1} - \frac{\pi}{Z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}} \right] / (1 - \sin \alpha_1), \quad (6)$$

где  $D_{1*}$  и  $h_{ш1*}$  представляют собой относительные значения диаметра расточки статора и высоты шлица паза статора соответственно, определяемые выражениями  $D_{1*} = D_1 / D_{1H}$ ,  $h_{ш1*} = h_{ш1} / D_{1H}$ .

Введем обозначения [1]:

$$k_{c.31} = D_1 \left[ \left( \frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_{\delta}}{p k_{c1} B_{c1}} \right) \sin \frac{\pi}{Z_1} - \frac{\pi}{Z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}} \right], \quad (7)$$

$$k_{ш.31} = D_1 \left[ (1 - h_{ш1*}) \sin \frac{\pi}{Z_1} - \frac{\pi}{Z_1} \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{31}} \right], \quad (8)$$

При учете обозначений (7) и (8) выражения (5) и (6) примут вид:  $r_{11} = \frac{1}{2} D_1 k_{c.31} / (1 + \sin \alpha_1)$ ,  $r_{12} = \frac{1}{2} D_1 k_{ш.31} / (1 - \sin \alpha_1)$ . Подставив полученные выражения для  $r_{11}$  и  $r_{12}$  в  $Q_{п1}$  и введя дополнительные обозначения:

$$k'_{z1} = Z_1 \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 + \frac{2}{Z_1} \right) + \operatorname{ctg} \frac{\pi}{Z_1} \right] / \left( 1 + \sin \frac{\pi}{Z_1} \right)^2,$$

$$k''_{z1} = Z_1 \left[ \frac{\pi}{2} \left( 1 - \frac{2}{Z_1} \right) - \operatorname{ctg} \frac{\pi}{Z_1} \right] / \left( 1 - \sin \frac{\pi}{Z_1} \right)^2,$$

получим следующее окончательное выражение для полной площади всех  $Z_1$  овальных пазов статора:

$$Q_{п1} = k_{п1} D_1^2, \quad k_{п1} = \frac{1}{4} (k_{c.31}^2 k'_{z1} + k_{ш.31}^2 k''_{z1}). \quad (9)$$

Из выражений следует, что полная площадь овальных пазов статора, прежде всего, пропорциональна квадрату диаметра расточки статора  $D_1$ . При этом коэффициент пропорциональности  $k_{п1}$

содержит два слагаемых, первое из которых  $k_{с.з1}$  отражает сердечник статора и зубцы, а второе  $k_{ш.з1}$  определяется шлицами и зубцами статора. В состав этих слагаемых в качестве сомножителей входят два коэффициента  $k'_{z1}$  и  $k''_{z1}$ , полностью зависящих только от числа пазов статора  $Z_1$ . Выражение для  $Q_{п1}$  содержит два относительных размера:  $D_{1*}$  и  $h_{ш1*}$ . Следует иметь в виду, что  $h_{ш1*} \ll 1$ , и поэтому при практических расчетах можно использовать следующее более простое выражение:

$$k_{ш.з1} = \left( \sin \frac{\pi}{Z_1} - \frac{\pi}{Z_1} \frac{B_\delta}{k_{с1} B_{з1}} \right).$$

В результате оказывается, что в состав коэффициента пропорциональности  $k_{п1}$  входят только варьируемая независимая переменная  $D_{1*}$  и три магнитных индукции  $B_\delta$ ,  $B_{з1}$  и  $B_{с1}$ , а также число пазов статора  $Z_1$ , которое выбирается в зависимости от мощности, размеров машины или из каких-либо других соображений.

Высота шлица паза статора  $h_{ш1}$  учитывается в дальнейшем после определения основных размеров двигателя, во-первых, при вычерчивании листа статора и, во-вторых, когда перед проектированием обмотки, вычисляется фактическая площадь паза статора.

Выражение (3) для электромагнитного момента  $M_{эм}$  содержит полезный магнитный поток  $\Phi_\delta$  в воздушном зазоре ВД, определяемый выражением  $\Phi_\delta = 2B_\delta \tau_1 l_1 / \pi$ , где полюсное деление по расточке статора  $\tau_1 = \pi D_1 / (2p)$ , и тогда окончательно  $\Phi_\delta = B_\delta D_1 l_1 / p$ . После подстановки этого выражения, а также первого из выражений (9) в (3) получим

$$M_{эм} = \frac{c_1 \pi f_1 \gamma_1 k_{об1}^2 k_{Г1}}{8k_{\theta 1}} \frac{B_\delta^2 D_1^4 l_1^2 k_{п1}}{\left( l_1 + 2l_{в1} + \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p} \right) p} F_{Iq}.$$

В данном выражении введем следующие обозначения [1]:

$$k_F = \frac{c_1 \pi f_1 \gamma_1 k_{об1}^2 k_{Г1}}{8k_{\theta 1}},$$

$$F_M = \frac{B_\delta^2 D_1^4 l_1^2 k_{п1}}{\left( l_1 + 2l_{в1} + \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p} \right) p}$$

и получим для  $M_{эм} = k_F F_M F_{Iq}$ . При этом в состав коэффициента  $k_F$  входят две постоянные величины  $f_1, \gamma_1$ , имеющие фиксированные числовые значения, и ряд величин:  $c_1, k_{об1}, k_{\theta 1}, k_{Г1}$ , числовые значения которых меняются в ограниченных пределах, так что коэффициент  $k_F$  в целом всегда имеет определенное числовое значение.

Величину  $F_M$  назовем функциональным множителем, играющим главную роль в выражении для электромагнитного момента  $M_{эм}$ , так как именно он обеспечивает оптимизацию продольно поперечной геометрии ВД и содержит физические связи между величинами, участвующими в процессе преобразования энергии в данном двигателе.

Преобразуем выражение для функционального сомножителя  $F_M$  путем деления и умножения его на  $D_{н1}^5$ , т.е. на наружный диаметр пакета стали статора в пятой степени, и тогда, переобозначив этот сомножитель через  $F_{M*}$ , получим результат в следующем виде:

$$F_{M*} = \frac{B_\delta^2 D_{1*}^4 l_{1*}^2 k_{п1}}{\left( l_{1*} + 2l_{в1*} + \beta_1 \frac{\pi(D_{1*} + h_{п1*})}{2p} \right) p}. \quad (10)$$

Здесь  $D_{1*} = D_1 / D_{н1}$  – относительный диаметр расточки статора;  $l_{1*} = l_1 / D_{н1}$  – относительная длина пакета стали статора;  $l_{в1*} = l_{в1} / D_{н1}$  – относительная длины вылета лобовой части обмотки статора;  $h_{п1*} = h_{п1} / D_{н1}$  – относительная высота паза статора.

Высота овального паза статора в соответствии с рис. 1 определяется следующим выражением  $h_{п1} = r_{11} + h_{ц1} + r_{12} + h_{ш1}$ , где расстояние между центрами полуокружностей овального паза статора  $h_{ц1} = (r_{11} - r_{12}) / \sin \alpha_1$ . Вычислим сумму  $r_{11} + h_{ц1} + r_{12} = r_{11} + (r_{11} - r_{12}) / \sin \alpha_1 + r_{12} = r_{11} (1 + \sin \alpha_1) / \sin \alpha_1 - r_{12} (1 - \sin \alpha_1) / \sin \alpha_1$ . С учетом данного выражения высота овального паза статора  $h_{п1} = r_{11} (1 + \sin \alpha_1) / \sin \alpha_1 - r_{12} \times (1 - \sin \alpha_1) / \sin \alpha_1 + h_{ш1}$ .

Преобразуем выражения для радиусов  $r_{11}$  и  $r_{12}$ , в которых введем следующие обозначения:

$$A_1 = \left( \frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_\delta}{pk_{cl}B_{cl}} \right) \sin \frac{\pi}{Z_1} - \frac{\pi}{Z_1} \frac{B_\delta}{k_{cl}B_{3l}},$$

$$A_2 = (1 - h_{ш1*}) \sin \frac{\pi}{Z_1} - \frac{\pi}{Z_1} \frac{B_\delta}{k_{cl}B_{3l}},$$

и тогда

$$\eta_{11} = \frac{1}{2} D_1 A_1 / (1 + \sin \alpha_1),$$

$$\eta_{12} = \frac{1}{2} D_1 A_2 / (1 - \sin \alpha_1).$$

При учете этих выражений получим для высоты  $h_{ш1} = \frac{1}{2} D_1 (A_1 - A_2) / \sin \alpha_1 + h_{ш1*}$ . С учетом обозначений для  $A_1$  и  $A_2$  окончательное выражение для высоты  $h_{ш1}$  примет следующий вид:  $h_{ш1} = \frac{1}{2} D_1 \left( \frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_\delta}{pk_{cl}B_{cl}} - 1 + h_{ш1*} \right) + h_{ш1*}$ , или в относительных единицах:  $h_{ш1*} = \frac{1}{2} D_{1*} \times \left( \frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_\delta}{pk_{cl}B_{cl}} - 1 + h_{ш1*} \right) + h_{ш1*}$ . При анализе выражения для функционального множителя  $F_{M*}$  относительной высотой шлица паза  $h_{ш1*}$  без особой погрешности можно пренебречь, и тогда окончательно для овального паза статора имеем

$$h_{ш1*} = \frac{1}{2} D_{1*} \left( \frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_\delta}{pk_{cl}B_{cl}} - 1 \right).$$

При учете (10) функциональный множитель  $F_M$  примет вид  $F_M = F_{M*} D_{ш1}^5$ , и тогда для электромагнитного момента ВД будем иметь

$$M_{эм} = k_F F_{M*} D_{ш1}^5 F_{Iq}. \quad (11)$$

Из данного выражения следует, что электромагнитный момент ВД пропорционален наружному диаметру пакета стали статора в пятой степени. И поскольку этот диаметр – единственный абсолютный размер в (11), то при известных числовых значениях всех остальных величин –  $k_F$ ,  $F_{M*}$ ,  $F_{Iq}$  – может быть однозначно определен (в отличие от машинной постоянной Арнольда) указанный диаметр  $D_{ш1}$ , с которого и начинается в данном случае расчет ВД.

В (11) ключевым является функциональный множитель в относительных единицах  $F_{M*}$ , который в соответствии с изложенной в [1] идеологией, должен иметь единственный максимум в плоскости двух независимых переменных: магнитной индук-

ции в воздушном зазоре  $B_\delta$  и относительного диаметра расточки статора  $D_{1*}$ .

Магнитная индукция  $B_\delta$  в воздушном зазоре электрических машин изменяется, как правило, в ограниченных пределах и не превосходит в большинстве случаев 1.5 Тл. Что же касается диаметра расточки статора, то его числовое значение зависит прежде всего от электромагнитного момента рассчитываемой электрической машины и достаточно неопределенно. Введение в рассмотрение относительного диаметра расточки статора  $D_{1*}$  позволяет раскрыть эту неопределенность, имея в виду, что всегда  $D_{1*} \in (0; 1)$ . Точно так же наличие в выражении (10) для электромагнитного момента  $M_{эм}$  относительной длины  $l_{1*}$  дает возможность заранее задать желаемую продольную геометрию машины относительно наружного диаметра пакета стали статора  $D_{1н}$ .

Предполагается, что ВД имеет возбуждение от постоянных магнитов. Поэтому в дальнейшем возможны три варианта оптимизации поперечной геометрии этого двигателя.

В первом простейшем варианте целесообразно рассмотреть поперечную оптимизацию относительно электромагнитного момента только для статора, когда полученные оптимальные значения магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_{\delta m}$  и относительного диаметра расточки статора  $D_{1*m}$  и соответствующее им оптимальное (максимальное) значение  $F_{M*m}$  функционального множителя  $F_{M*}$  характеризуют наилучшее использование материалов в объеме активного ядра ВД относительно его электромагнитного момента. При этом постоянные магниты будут иметь подчиненное значение, так как они должны будут обеспечить полученное оптимальное значение магнитной индукции  $B_{\delta m}$ .

Во втором комплексном варианте следует выполнить анализ глобальной поперечной геометрии ВД, когда в качестве независимых переменных можно принять по-прежнему  $D_{1*}$ , а вместо  $B_\delta$  коэффициент полюсного перекрытия  $\alpha_2$ , определяющий поперечную геометрию постоянных магнитов. При этих условиях поиск максимума функционального множителя  $F_{M*}$  происходит в плоскости двух переменных  $D_{1*}$  и  $\alpha_2 \in (0; 1)$ . Результат, т. е. оптимальные значения  $D_{1*}$ ,  $B_{\delta m}$ , а также максимум  $F_{M*m}$ , будет существенно зависеть от свойств материала постоянного магнита.

В третьем варианте в качестве основного критерия принимается наилучшее использование материала постоянного магнита. Предполагается, что данное условие будет выполняться, если постоянный магнит работает в точке прямой возврата, соответствующей его наибольшей магнитной энергии.

Сравнение результатов расчета перечисленных вариантов даст возможность уточнить оптимальную поперечную геометрию с точки зрения использования активных материалов, т. е. получения минимального объема активных материалов при фиксированном электромагнитном моменте двигателя.

Основные результаты проведенных в статье исследований могут быть сформулированы в виде следующих положений:

1. Составлено выражение, определяющее площадь овальных пазов статора при минимально возможном числе переменных, к которым относятся два геометрических размера (наружный диаметр пакета стали, диаметр расточки статора),

а также два значения магнитных индукций на участках магнитной системы статора (максимальные значения магнитных индукций в зубцах статора и в его сердечнике), и которые однозначно описывают поперечную геометрию статора.

2. Сформулирован критерий оптимизации ВД и применительно к нему составлено выражение для электромагнитного момента ВД, в состав которого входит наружный диаметр пакета стали статора как единственный абсолютный геометрический размер.

3. Синтезировано выражение для функционального множителя, связывающего воедино все основные физические величины, позволяющие выполнить расчет ВД оптимального по степени использования активных материалов относительно его электромагнитного момента.

4. В состав выражения для функционального множителя входит относительная длина пакета стали статора, что позволяет на начальном этапе расчета ВД заранее задать его продольную геометрию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ваганов М. А., Пименова И. А. Основы расчета электрических машин переменного тока. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 156 с.

2. Боровик А. С., Ваганов М. А., Пименова И. А. Электромагнитный момент вентильного двигателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 2. С. 43–48.

---

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

### MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMAL LONGITUDINAL TRANSVERSE GEOMETRY OF THE BLDC MOTOR

*The formed mathematical model of the BLDC motor on the basis of which can be obtained analytically optimal values of the relative diameter of the bore of the stator and the magnetic induction in the air gap, ensuring the best use of the materials in the volume of the active core of the engine relative to its magnetic moment. For ease of analysis, in General a system of relative units for linear dimensions. As the base size is taken by the outer diameter of the steel package of the stator. In the presented mathematical model is the main functional factor, which contains all the information about the relationships between physical quantities and geometrical dimensions involved in the process of energy conversion in the valve engine. The mathematical model provides an opportunity to assess the impact of independent variables on the main dimensions, and technical and economic indicators of the brushless DC motor in Genera.*

**Oval-shaped stator slots, the relative diameter of the bore of the stator, the relative length of the steel package of the stator, the magnetic induction in the air gap, the coefficient of proportionality of the square groove, electromagnetic torque, a functional cofactor, a parametric factor**