

УДК 621.313

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

Оптимизация поперечной геометрии вентильного двигателя относительно электромагнитного момента

Выполнен анализ математической модели электромагнитного момента вентильного двигателя, в ходе которого установлено существование оптимальных значений относительного диаметра расточки статора двигателя и магнитной индукции в его воздушном зазоре. Эти две величины определяют максимум функционального сомножителя, характеризующего наилучшее использование активных материалов вентильного двигателя в объеме его активного ядра относительно электромагнитного момента, рассматриваемого в качестве критерия оптимальности. Рассматривается влияние числа пазов статора на полную площадь всех пазов статора при разных значениях магнитных индукций в зубцах и в сердечнике статора. Установлено слабое влияние этих магнитных индукций на площадь пазов, но при этом выявлено, что увеличение числа полюсов вентильного двигателя сопровождается снижением площади пазов статора. Существует оптимальное число полюсов двигателя, при котором функциональный множитель достигает наибольшего значения, что соответствует наилучшему использованию его активных материалов. Однако при возрастании числа полюсов увеличиваются оптимальные значения магнитной индукции в воздушном зазоре и относительный диаметр расточки статора.

Электромагнитный момент, функциональный сомножитель, относительный диаметр расточки статора, относительная длина пакета стали статора, магнитная индукция в воздушном зазоре, коэффициент пропорциональности площади паза, график поверхности функции, участок магнитной цепи, число пар полюсов, число зубцов

В [1] в соответствии с процессом преобразования энергии в вентильном двигателе (ВД) составлена его математическая модель, основу которой образует выражение для электромагнитного момента, преобразованная в дальнейшем к виду, позволяющему выполнять раздельный анализ всех физических величин, входящих в состав этого электромагнитного момента, с целью получения их оптимальных значений, обеспечивающих наилучшее использование активных материалов ВД, и дающему возможность в последующем однозначно определить основные размеры двигателя и его обмоточные данные.

Выражение для электромагнитного момента ВД состоит из ряда сомножителей, имеющих конкретный физический смысл и не связанных между собой, что упрощает процедуру их анализа, имеет следующий вид:

$$M_{эм} = k_F D_{1н}^5 F_{M*} F_{Iq}, \quad (1)$$

где k_F – коэффициент, объединяющий все постоянные или практически величины, которые входят в выражение для электромагнитного момента

ВД; $D_{1н}$ – неизвестный наружный диаметр пакета стали статора проектируемого ВД; F_{M*} – функциональный сомножитель, представляющий собой ядро оптимизации; F_{Iq} – функция поперечной составляющей тока обмотки статора ВД (параметрический множитель, зависящий от угла нагрузки θ) [2].

В выражении (1) функциональный сомножитель F_{M*} содержит в себе всю необходимую информацию о связях между физическими величинами, определяющими основные технико-экономические показатели качества рассматриваемого ВД:

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

Это, прежде всего, главные размеры ВД, а именно относительные значения диаметра расточки статора D_{1*} и длины пакета стали статора l_{1*} , а также значение магнитной индукции в воз-

душном зазоре B_{δ} ; затем – число пар полюсов p двигателя и, наконец, наружный диаметр $D_{1н}$ пакета стали статора. Второе слагаемое в квадратных скобках знаменателя характеризует вылет лобовых частей обмотки статора, а третье слагаемое определяет длину тангенциальную части с учетом возможного укорочения шага обмотки. Множитель в числителе $k_{п1}$ описывает геометрию зубцовой зоны статора.

Вентильные двигатели имеют мощность, как правило, не превосходящую несколько киловатт, и поэтому в большинстве случаев в них используются на статоре для укладки обмотки овальные или трапециевидные пазы, в которых размещаются мягкие секции, выполненные из медного обмоточного провода кругового сечения.

В рассматриваемом случае на статоре приняты пазы овальной формы, для которых коэффициент $k_{п1}$ определяется следующим выражением из [3]:

$$\frac{1}{4} \left(k_{с1з1}^2 k'_{z1} + k_{ш1з1}^2 k''_{z1} \right). \quad (3)$$

В функциональном множителе F_{M*} в качестве основных независимых переменных примем относительный диаметр расточки статора D_{1*} и магнитную индукцию в воздушном зазоре B_{δ} ВД. При этом условии все остальные величины, входящие в состав функции F_{M*} , принимаются постоянными. Это, прежде всего, относительная длина l_1^* пакета стали статора, которая в данной статье $l_1^* = 0.5$. Число пар полюсов будет иметь четыре значения: $p = 1-4$. Длина вылета лобовой части обмотки статора $l_{в1}^* = 0.1$. Укорочение шага обмотки статора $\beta_1 = 0.75$. Числовые значения магнитных индукций в зубцах $B_{з1}$ и в сердечнике $B_{с1}$ статора, входящие в выражение (3), выбираются из табл. 1 в [4].

Предварительный анализ произведения трех сомножителей в числителе выражения (2) $D_{1*}^4 B_{\delta}^2 k_{п1}$ показывает, что оно описывает трехмерную поверхность в плоскости D_{1*} , B_{δ} . Результаты полного расчета функции $F_{M*} = f(D_{1*}, B_{\delta})$ по (2) графически представлены на рис. 1. Действительно имеем трехмерную поверхность, расположенную на плоскости D_{1*} , B_{δ} . Вершина этой фигуры определяет максимум

функционального множителя F_{M*} . Из этого следует реальное существование оптимальных значений относительного диаметра расточки статора D_{1*m} и магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta m}$ вентильного двигателя, при которых наилучшим образом используются материалы активного ядра рассматриваемого двигателя относительно электромагнитного момента.

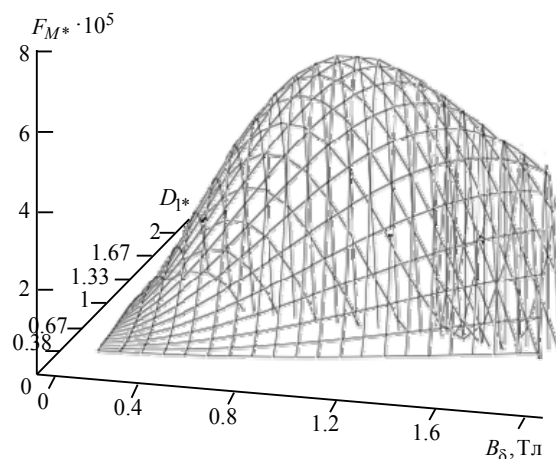


Рис. 1

Расчет выполнен при следующих значениях исходных данных: значения магнитных индукций в зубцах и в сердечнике статора $B_{з1} = 1.7$ и $B_{с1} = 1.5$ Тл соответственно, относительная длина пакета стали статора $l_1^* = 0.5$, число полюсов двигателя $2p = 4$. При этих условиях имеем следующие оптимальные значения $D_{1*m} = 0.457$, $B_{\delta m} = 1.167$ Тл и соответствующее им максимальное значение функционального множителя $F_{M*m} = 3.568 \cdot 10^{-5}$.

Теперь следует оценить влияние магнитных индукций в зубцах $B_{з1}$ и сердечнике статора $B_{с1}$ на зависимости $F_{M*} = f(D_{1*})$ при $B_{\delta} = B_{\delta m} = \text{const}$ и $F_{M*} = f(B_{\delta})$ при $D_{1*} = D_{1*m} = \text{const}$, приняв в качестве стартовых значений $B_{з1} = 1.7$ и $B_{с1} = 1.5$ Тл, и в дальнейшем их будем увеличивать одновременно с шагом 0.1 Тл. Этот расчет выполним для четырех значений числа полюсов $2p = 2, 4, 6, 8$.

На рис. 2–5 графически представлены результаты расчета зависимостей зависимости $F_{M*} = f(D_{1*})$ при $B_{\delta} = B_{\delta m} = \text{const}$ и $F_{M*} = f(B_{\delta})$

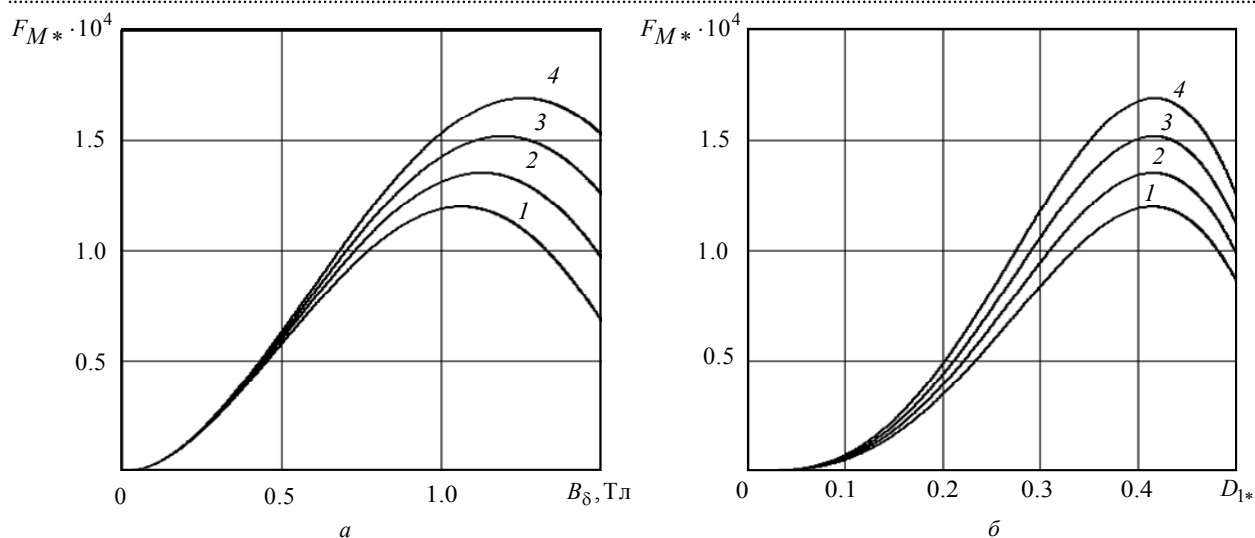


Рис. 2

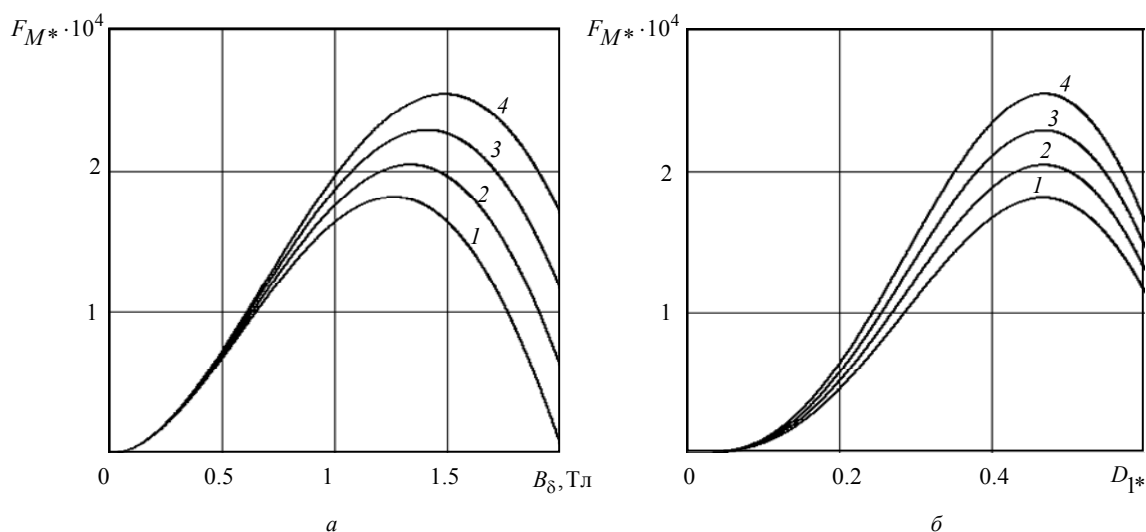


Рис. 3

при $D_{1*} = D_{1*m} = \text{const}$. На каждом рисунке изображены по четыре графика, маркированных цифрами 1–4, соответствующих последовательно возрастающим значениям магнитных индукций B_{31} и B_{c1} : 1.7 и 1.5; 1.8 и 1.6; 1.9 и 1.7; 2.0 и 1.8 Тл соответственно. Каждая пара рисунков *а–б* соответствует одной из пар полюсов 1–4.

Из рис. 2–5 видно, что при всех числах пар полюсов p повышение магнитных индукций в зубцах B_{31} и в сердечнике B_{c1} статора сопровождается увеличением функции F_{M*} . При этом возрастает оптимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta m}$ (максимумы функций $F_{M*} = f(B_{\delta})$ смещаются вправо в сторону больших значений B_{δ}), а оптимальные значения относительного диаметра расточки статора D_{1*m} остаются практически неизменными, лишь

незначительно увеличиваясь, т. е. максимумы графиков функции $F_{M*} = f(D_{1*})$ располагаются практически на одной вертикали. Это означает, что числовые значения магнитных индукций на участках магнитной системы ВД оказывают очень слабое влияние на поперечную геометрию рассматриваемых двигателей.

Рис. 2–5 позволяют выполнить предварительную оценку влияния числа полюсов двигателя на его поперечную геометрию. В частности, видно, что увеличение числа полюсов $2p$, сопровождается возрастанием оптимальных значений как относительного диаметра расточки статора D_{1*m} , так и магнитной индукции $B_{\delta m}$ в воздушном зазоре, т. е. максимумы функций $F_{M*} = f(D_{1*})$, $F_{M*} = f(B_{\delta})$ смещаются вправо и при этом меняются также амплитудные значения F_{M*m} функции F_{M*} .

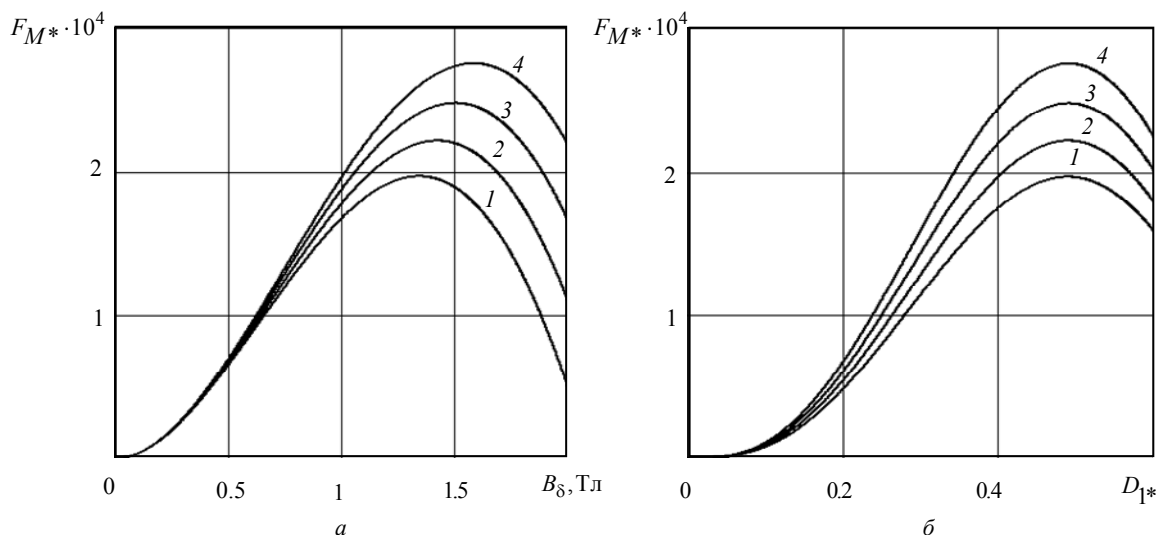


Рис. 4

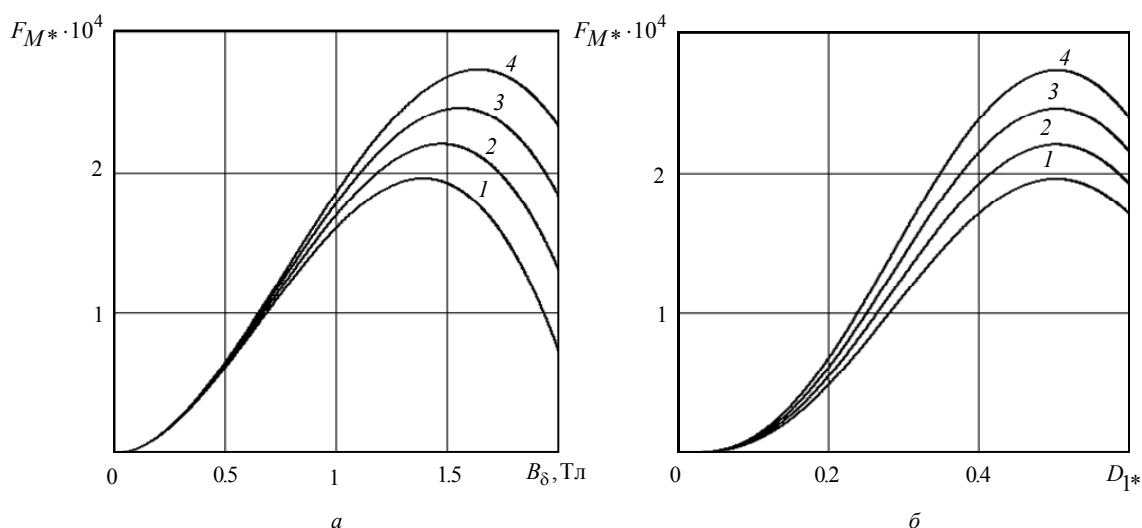


Рис. 5

Для получения более полной и наглядной картины влияния числа полюсов ВД на его поперечную геометрию выполним соответствующие расчеты для двух пар значений магнитных индукций на участках магнитной цепи статора, а именно, $B_{\delta 1} = 1.7$ и 2.0 Тл, $B_{\delta 1} = 1.5$ и 1.8 Тл, при числе пазов статора $z_1 = 24, 36$ и 48 и относительной длине пакета стали статора $l_{1*} = 0.5$. Результаты этих расчетов сведены в таблицу, а на рис. 6 графически представлены зависимости $F_{M*} = f(2p)$, $B_\delta = f(2p)$, $D_{1*} = f(2p)$ при числе полюсов $2p = 2, 4, 6, 8$.

Из таблицы и графиков на рис. 6, а, видно, что функциональный множитель F_{M*} имеет минимальное значение в двухполюсных ВД, в дальнейшем с увеличением числа полюсов возрастает,

достигает максимума при $2p = 6$ и затем монотонно снижется. Из этого следует, что двухполюсные ВД имеют наихудшее использование активных материалов, наилучшее использование активных материалов свойственно шестиполюсному двигателю. Данный вывод естественно распространяется и на материал постоянных магнитов, расположенных на роторе двигателя. На рис. 6, а кривая 1 соответствует минимальным значениям магнитных индукций $B_{\delta 1}$ и $B_{\delta 1}$, а кривая 2 построена при больших значениях перечисленных магнитных индукций. С повышением значений магнитных индукций $B_{\delta 1}$ и $B_{\delta 1}$ максимум F_{M*} функционального множителя F_{M*} возрастает.

Следует также отметить, что в асинхронных двигателях степень использования материалов в

Значения магнитной индукции на участках магнитной цепи статора (B_{31} и B_{c1}), Тл	Число полюсов ($2p$)	Максимум функционального множителя ($F_{M*} \cdot 10^4$)	Оптимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре ($B_{\delta m}$), Тл	Оптимальное значение относительного диаметра расточки статора (D_{1*m})
$B_{31} = 1.7$ $B_{c1} = 1.5$	2	1.196	1.059	0.414
	4	1.811	1.256	0.465
	6	1.968	1.339	0.489
	8	1.955	1.387	0.501
$B_{31} = 2.0$ $B_{c1} = 1.8$	2	1.693	1.253	0.416
	4	2.544	1.482	0.467
	6	2.755	1.579	0.490
	8	2.731	1.634	0.502

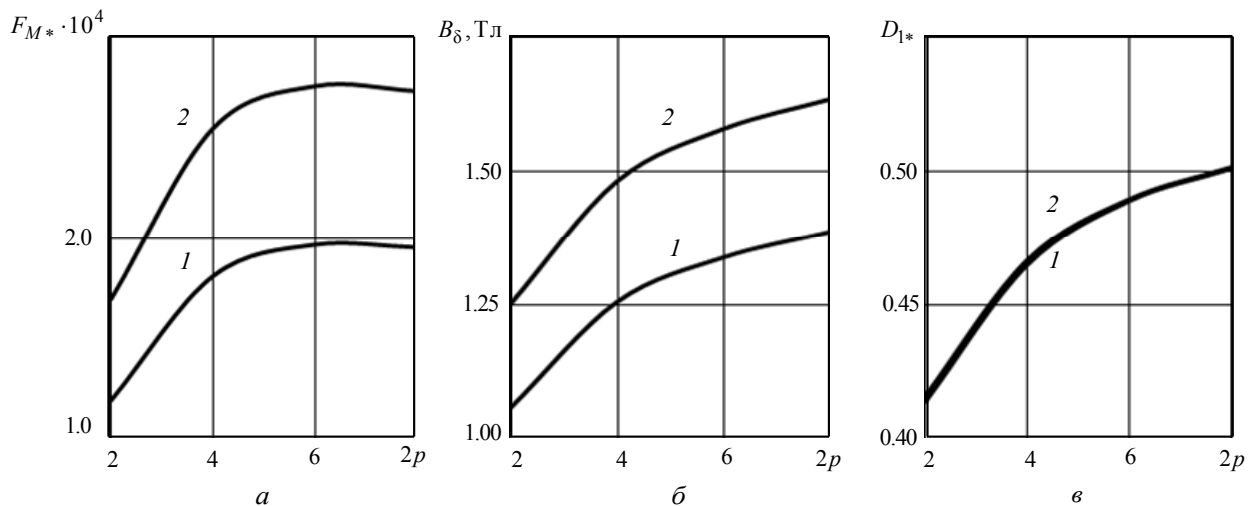


Рис. 6

объеме активного ядра тоже зависит от числа полюсов и эта зависимость имеет практически аналогичный характер, т. е. наиболее эффективными в этом плане оказываются 4- и 6-полюсные асинхронные двигатели.

Увеличение значений магнитных индукций B_{31} и B_{c1} имеет своим следствием монотонное возрастание оптимального значения $B_{\delta m}$ магнитной индукции в воздушном зазоре (рис. 6, б) при увеличении числа полюсов. Что же касается оптимального значения относительного диаметра расточки статора D_{1*m} , то оно также повышается при увеличении $2p$, но при этом практически не зависит от значений магнитных индукций на участках магнитной системы статора двигателя (кривые 1 и 2 на рис. 6, в сливаются).

Число пазов статора z_1 входит в выражение коэффициента пропорциональности $k_{п1}$, который

определяет площадь пазов статора вентильного двигателя. Поэтому целесообразно также оценить влияние z_1 на поперечную геометрию двигателя. С этой целью следует рассчитать по (3) зависимость $k_{п1} = f(z_1)$. При выполнении данного расчета задаем значение числа пазов статора z_1 и затем по (2) определяем оптимальные значения магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta m}$ и относительного диаметра D_{1*m} расточки статора, после чего рассчитываем соответствующее значение коэффициента $k_{п1}$ по (3). Расчет выполняется для двух пар значений магнитной индукции в зубцах B_{31} и в сердечнике B_{c1} статора двигателя, указанных в таблице, и для числа пар полюсов двигателя $p = 1-4$. Результаты расчета представлены графически на рис. 7, а-г, на которых буквенные обозначения а-г соответствуют числу пар полюсов $p = 1-4$.

Как видно из рис. 7, все зависимости $k_{п1} = f(z_1)$ являются монотонными. Коэффициент $k_{п1}$ во всех случаях достаточно быстро нарастает при малом числе пазов статора $z_1 < 20$ и в дальнейшем меняется незначительно. Таким образом, в целом увеличение z_1 сопровождается возрастанием площади пазов, а следовательно, повышается степень использования зубцовой зоны статора относительно обмотки статора.

При увеличении числа пар p полюсов двигателя коэффициент пропорциональности $k_{п1}$ снижается, что обусловлено, в соответствии с рис. 6, в, увеличением магнитной индукции $B_{\delta m}$ в воздушном зазоре, так как при этом для фиксированных значений магнитных индукций в зубцах статора B_{31} возрастает ширина зубцов и снижается ширина пазов статора, а значит уменьшается и площадь пазов статора.

На каждом из рис. 7 представлены по две кривых, соответствующих двум парам значений магнитных индукций в зубцах B_{31} и в сердечнике $B_{с1}$ статора двигателя (1.7 и 1.5; 2.0 и 1.8 Тл). Влияние этих магнитных индукций на коэффициент $k_{п1}$ в зависимости от числа пар полюсов двигателя несколько своеобразно.

Так, в двух полюсных двигателях (рис. 7, а) большим значениям магнитных индукций (кривая 2) – соответствуют меньшие значения $k_{п1}$ (кривая 2), т. е. кривая 2 смещается незначительно вниз относительно кривой 1. Но уже при $p = 2$ кривые пересекаются при $z_1 = 30$, а при $p > 2$ кривые 2 располагаются выше кривых 1.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Анализ выражения для функционального сомножителя показывает, что существуют оптимальные значения относительного диаметра ротора статора и магнитной индукции в воздушном

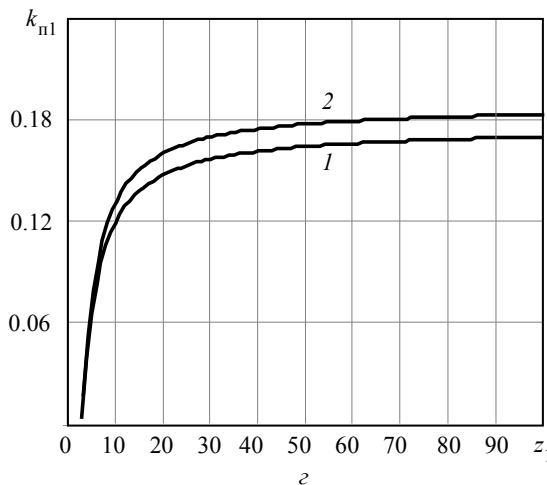
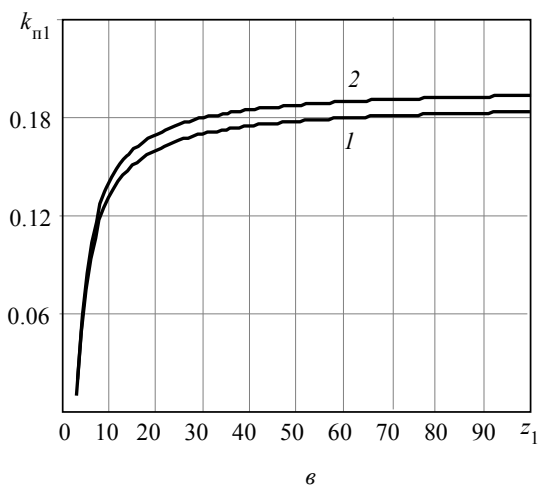
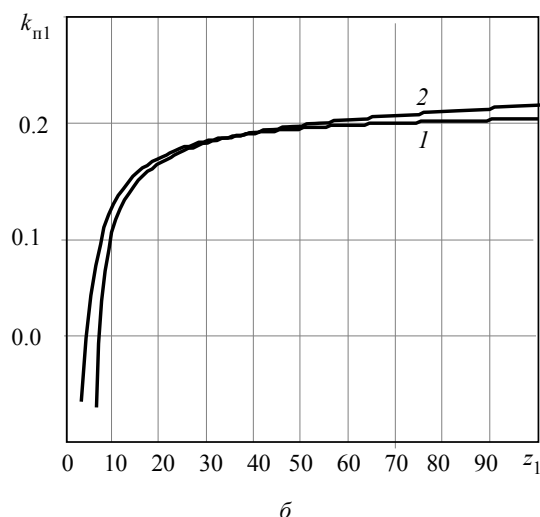
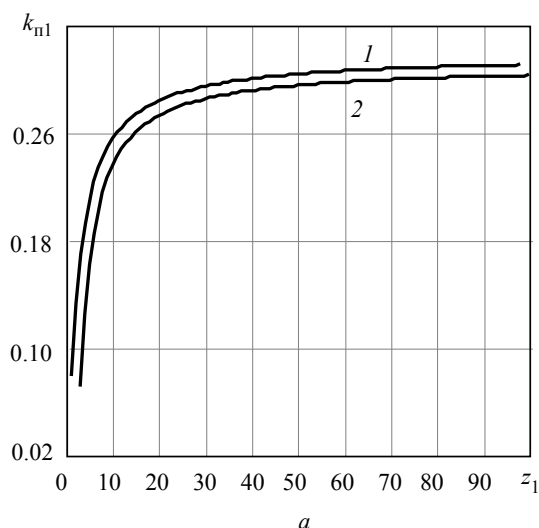


Рис. 7

зоре, обеспечивающие наилучшее использование активных материалов вентильного двигателя.

2. Увеличение значений магнитных индукций в зубцах и в сердечнике статора двигателя сопровождается возрастанием оптимального значения магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя.

3. Относительное значение оптимального диаметра расточки статора двигателя практически не зависит от значений магнитных индукций на участках его магнитной цепи.

4. При увеличении числа полюсов двигателя возрастает значение функционального множителя, достигающего максимального значения в шести полюсных двигателях.

5. Значения магнитных индукций в зубцах и в сердечнике статора практически не влияют на коэффициент пропорциональности в выражении для площади пазов статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боровик А. С., Ваганов М. А. Математическая модель оптимальной продольно поперечной геометрии вентильного двигателя // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 7. С. 57–62.

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

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

4. Влияние длины пакета стали статора асинхронного двигателя на его оптимальную поперечную геометрию / И. А. Бутылин, М. А. Ваганов, Ю. А. Грубман, М. В. Демина, И. А. Пименова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2015. № 5. С. 67–73.

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

OPTIMIZING THE TRANSVERSE GEOMETRY OF THE BLDC MOTOR FROM THE-RELATIVELY ELECTROMAGNETIC TORQUE

The analysis of the mathematical model of the electromagnetic torque of the BLDC motor, in which the existence of the optimal values of the relative diameter of the bore of the motor stator and the magnetic induction in its air gap. These two values determine the maximum functional sonoita-La, characterizing the best use of active materials valve engine in volume of its actively-th kernel relative to the electromagnetic torque, which is considered as the criterion of optimality. Examines the impact of the number of grooves of the stator on the full area of all grooves of the stator with different values of the magnetic induction in the teeth and in the stator core. Showed weak influence of these magnetic inductions into the square grooves, but at the same time revealed that the increase in the number of poles of the brushless DC motor is accompanied by a SNI zheniem square grooves of the stator. There is an optimal number of motor poles in which the functional multiplier reaches the highest value, which corresponds to the best use of its active materials. On the other hand with increasing number of poles are increased, the optimal value of magnetic induction in the air gap and the relative bore diameter stator.

The graph surface function, plot the magnetic TSE-PI, the number of pairs of poles, number of teeth