

УДК 621.313

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

Оптимальная поперечная геометрия синхронных явнополюсных двигателей

Рассматривается математическая модель проектирования синхронного явнополюсного двигателя, позволяющая однозначно определить оптимальные значения диаметра расточки статора машины и ее магнитной индукции, тем самым обеспечивая наилучшее использование активных материалов двигателя.

Относительный диаметр расточки статора, магнитная индукция в воздушном зазоре, магнитная индукция в зубцах и ярмах сердечника, функциональный множитель, относительная длина пакета стали статора, электромагнитный момент

Будем считать, что расход активных материалов в объеме активного ядра машины относительно электромагнитного момента данной машины является одним из показателей качества машины, и примем этот показатель в качестве основного критерия расчета [1]. Исходя из этого, попробуем сформулировать принцип создания математической модели, описывающей такой критерий.

Предположим, что наружный диаметр и длина пакета стали статора, а также длина воздушного зазора между расточкой статора и поверхностью ротора зафиксированы. И проведем мысленный эксперимент относительно рассматриваемого синхронного явнополюсного двигателя. Начнем уменьшать диаметр расточки статора рассматриваемого двигателя, а соответственно, и его ротора, приближая их к диаметру вала за счет уменьшения радиальных размеров ротора в зоне расположения полюсов с катушками обмотки возбуждения. Это будет сопровождаться уменьшением потока возбуждения в воздушном зазоре двигателя и, соответственно, монотонным уменьшением электромагнитного момента, который, в конечном итоге, окажется равным нулю. Точно так же при увеличении диаметра расточки статора и наружного диаметра ротора будет уменьшаться высота зубцовой зоны статора, приближаясь к нулю, и электромагнитный момент снова будет монотонно стремиться к нулю. Из этого вполне однозначно следует, что обязательно должен существовать такой оптимальный диаметр расточки статора, при котором электромагнитный момент, развиваемый синхронным двигателем при фиксированном объеме активного ядра, будет максимально возможным и обеспечивающим наилуч-

шее использование активных материалов машины (стали двигателя и проводниковых материалов обмоток статора и ротора).

За основу создания математической модели, соответствующей проведенному мысленному эксперименту, примем выражение для электромагнитного момента синхронного явнополюсного двигателя.

Для определения оптимальных, с точки зрения использования активных материалов двигателя, значений диаметра расточки статора и магнитной индукции в воздушном зазоре используем выражение для электромагнитного момента синхронного явнополюсного двигателя [2]:

$$M_{эм} = \frac{k_{p1}}{\omega_1} F_{p1} = \frac{m_1 U_1^2}{r_1 \omega_1} F_{p1}, \quad (1)$$

где m_1 – число фаз обмотки статора; U_1 – фазное напряжение на зажимах обмотки статора; r_1 – активное сопротивление фазы обмотки статора; k_{p1} – коэффициент пропорциональности по мощности машины; $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ – синхронная угловая скорость вращения при частоте питающего напряжения f_1 . Представим U_1 как произведение ЭДС самоиндукции обмотки статора и коэффициента c_1 , а именно

$$U_1 = c_1 E_1. \quad (2)$$

Для ЭДС E_1 , в свою очередь, имеем

$$E_1 = \pi\sqrt{2} \cdot f_1 W_1 k_{об1} \Phi_\delta; \quad \Phi_\delta = D_1 l_1 B_\delta / p,$$

где Φ_δ – амплитуда вращающегося магнитного потока в воздушном зазоре; B_δ – амплитуда магнитной

индукции в воздушном зазоре; D_1 – диаметр расточки статора; l_1 – длина пакета стали статора; W_1 – число последовательно соединенных витков обмотки статора; $k_{об1}$ – обмоточный коэффициент обмотки статора; p – число пар полюсов двигателя.

Активное сопротивление фазы обмотки статора r_1 может быть представлено в виде

$$r_1 = \frac{2W_1 \left[l_1 + 2l_{в1} + \beta_1 \pi \left(\frac{D_1 + h_{п1}}{2p} \right) \right] k_{г1}}{\gamma_1 q_{a1}}, \quad (3)$$

где $l_{в1}$ – длина вылета лобовых частей обмотки статора; β_1 – укорочение шага обмотки статора; $k_{г1}$ – температурный коэффициент сопротивления обмотки статора; γ_1 – электропроводность материала обмотки статора; q_{a1} – площадь сечения проводника обмотки статора; $h_{п1}$ – высота паза (зубца) статора.

Суммарную площадь пазов статора $Q_{п1}$ можно выразить через полное сечение меди проводников обмотки статора $2 m_1 W_1 q_{a1}$, деленное на коэффициент заполнения паза статора проводом без изоляции $k_{г1}$, и тогда

$$Q_{п1} = \frac{2m_1 W_1 q_{a1}}{k_{г1}}. \quad (4)$$

С другой стороны, площадь пазов статора определяется выражением $Q_{п1} = k_{п1} D_1^2$, в котором коэффициент $h_{п1}$ зависит от формы пазов статора. Для прямоугольных открытых пазов статора коэффициент $h_{п1}$ имеет следующий вид:

$$k_{п1} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{з1}} \right) \times \left\{ \sqrt{\left(\frac{1}{D_{1*}} - \frac{B_{\delta}}{pk_{c1} B_{c1}} \right)^2 - \left[\frac{\pi}{z_1} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{з1}} \right) \right]^2} - \sqrt{1 - \left[\frac{\pi}{z_1} \left(1 - \frac{B_{\delta}}{k_{c1} B_{з1}} \right) \right]^2} \right\}, \quad (5)$$

где $B_{з1}$, B_{c1} – магнитные индукции в зубцах и сердечнике статора соответственно; k_{c1} – коэффициент заполнения пакета статора сталью. В выражение (5) был введен относительный диаметр расточки статора $D_{1*} = D_1/D_{1н}$, где $D_{1н}$ – наружный диаметр

пакета стали статора. Обозначение D_{1*} , во-первых, упрощает форму записи выражения, во-вторых, обеспечивает решение задачи в общем виде, т. е. безотносительно к конкретным линейным размерам машины.

Учитывая (2)–(5), после необходимых преобразований получим следующие выражения:

$$\frac{m_1 U_1^2}{\eta_1 \omega_1} = k_F F_M; \quad k_F = \frac{c_1^2 \pi f_1 k_{об1}^2 \gamma_1 k_{г1}}{4k_{г1}};$$

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

где k_F – коэффициент, содержащий все величины, значения которых фиксированы и/или определены конечным числовым значением. Преобразуем выражение для F_M , введя в него вместо линейных относительные значения диаметра расточки статора и длины пакета стали статора $D_{1*} = D_1/D_{1н}$, $l_{1*} = l_1/l_{1н}$ соответственно, и тогда оно примет вид

$$F_M = D_{1н}^5 F_{M*};$$

$$F_{M*} = \frac{D_{1*}^4 B_{\delta}^2 l_{1*}^2 k_{п1}}{\left[l_{1*} + 2l_{в1*} + \beta_1 \pi \left(\frac{D_{1*} + h_{п1*}}{2p} \right) \right] p}. \quad (6)$$

В результате исходное выражение (1) для электромагнитного момента синхронного явнополюсного двигателя примет следующий вид:

$$M_{эм} = k_F F_{M*} F_{p1} D_{1н}^5. \quad (7)$$

Из (7) следует, что электромагнитный момент, развиваемый синхронным явнополюсным двигателем, оказывается прямо пропорциональным функциональному множителю F_{M*} , содержащему в себе всю необходимую для теоретического анализа информацию о взаимных связях физических величин, определяющих основные свойства двигателя, а также пропорционален пятой степени наружного диаметра пакета стали статора $D_{1н}$, который и определяется в конечном итоге из выражения (7).

Функциональный множитель F_{M*} зависит от трех основных переменных, характеризующих продольно-поперечную геометрию синхронного явнополюсного двигателя: относительного диаметра расточки статора D_{1*} , магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ} и относительной длины пакета стали статора l_{1*} .

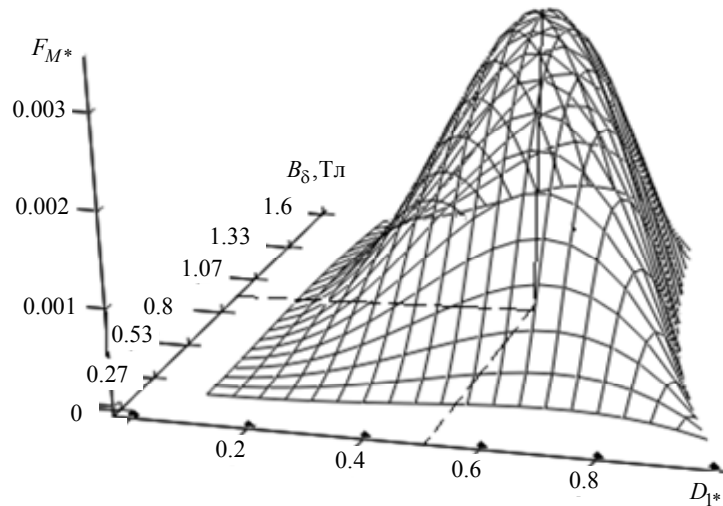


Рис. 1

Анализ выражения (7) показывает, что функция F_{M*} относительно плоскости двух основных переменных D_{1*} и B_{δ} описывает объемную фигуру, подобную стогу сена (рис. 1), и координаты вершины данной фигуры определяют оптимальные значения переменных D_{1*} и B_{δ} , а именно D_{1*m} и $B_{\delta m}$ на осях D_{1*} и B_{δ} , которым соответствует максимальное значение F_{M*m} функции F_{M*} . Так, например, при значениях магнитных индукций в зубцах и сердечнике статора $B_{31} = 1.6$ Тл, $B_{c1} = 1.3$ Тл, а также $2p = 4$ и относительной длине пакета стали статора $l_{1*} = 0.5$ имеем: $D_{1*m} = 0.551$, $B_{\delta m} = 0.888$ Тл и $F_{M*m} = 3.128 \cdot 10^{-3}$.

Как показывает рис. 1, функция $F_{M*} = f(D_{1*}, B_{\delta})$ имеет единственный максимум в области изменения (0.1) значений относительного диаметра расточки статора D_{1*} , что полностью согласуется с принципиальным положением, изложенным в начале данной статьи, в соответствии с которым и была разработана математическая модель, реализованная в статье.

В составе коэффициента пропорциональности $k_{П1}$, определяющего площадь пазов статора (5) и входящего в качестве сомножителя в выражение для F_{M*} , имеем магнитные индукции в зубцах B_{31} и в сердечнике B_{c1} статора, которые должны оказывать определенное влияние на числовые значения параметров D_{1*m} , $B_{\delta m}$ и F_{M*m} , характеризующих оптимальную поперечную геометрию синхронного реактивного двигателя.

Оценка влияния магнитных индукций B_{31} и B_{c1} на перечисленные параметры будет наиболее

наглядной, если рассчитать и построить следующие зависимости: $F_{M*m} = f(B_{\delta})$ при $D_{1*} = D_{1*m}$ и $F_{M*m} = f(D_{1*})$ при $B_{\delta} = B_{\delta m}$, т. е. организуются зависимости в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, каждый раз проходящих через вершину объемной фигуры $F_{M*} = f(D_{1*}, B_{\delta})$ при фиксированных значениях всех остальных переменных, а именно числе пар полюсов двигателя $p = \text{const}$ и относительной длине пакета стали статора $l_{1*} = 0.5$.

Перечисленные зависимости представлены графически на рис. 2–6 при $p = 2–5$ соответственно.

Анализ представленных зависимостей показывает, что увеличение магнитных индукций в зубцах и сердечнике статора синхронного явнополюсного двигателя сопровождается повышением максимального значения функционального множителя F_{M*} (кривая 1 построена для $B_{31} = 1.6$ Тл, $B_{c1} = 1.3$ Тл, а остальные кривые построены относительно кривой 1 с шагом 0.1, и тогда кривым 5 соответствуют магнитные индукции $B_{31} = 2$ Тл, $B_{c1} = 1.7$ Тл). При этом возрастает оптимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta m}$ и, соответственно, максимальные значения F_{M*m} функции F_{M*} смещаются вправо, т. е. в сторону больших значений B_{δ} .

Следует также отметить, что влияние магнитной индукции на участках магнитной цепи статора синхронного двигателя характеризуется однозначностью этого влияния, т. е. изменение значений указанных магнитных индукций вызывает изменение максимального значения F_{M*m} в од-

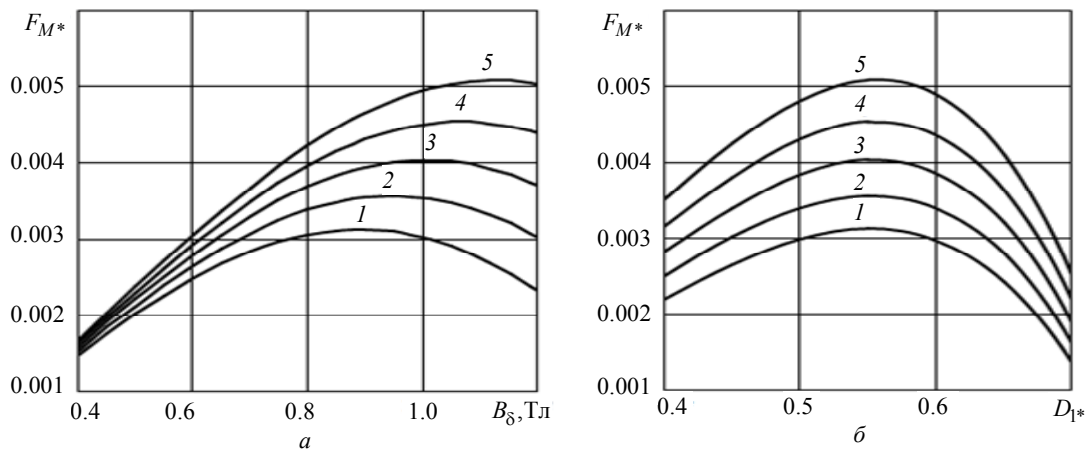


Рис. 2

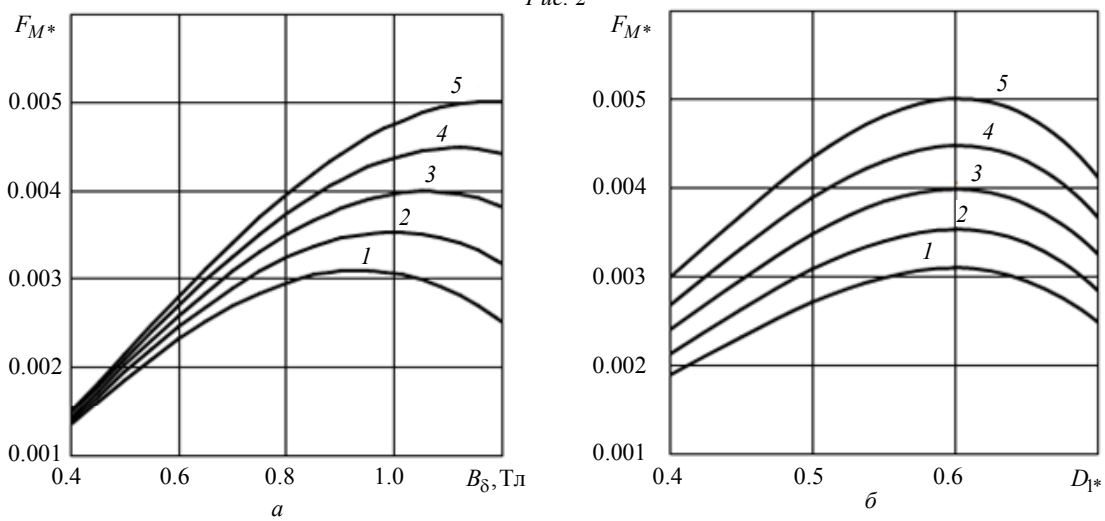


Рис. 3

ном направлении, что видно из (6), в котором магнитные индукции B_{31} и B_{c1} располагаются в знаменателях соответствующих дробей. Причем наибольшее влияние в связи со структурой (5) должна оказывать магнитная индукция B_{31} в зубцах статора, так как она содержится в самостоятельном множителе указанного выражения.

Что же касается оптимального значения D_{1*m} относительного диаметра расточки статора D_{1*} , то оно практически не зависит от магнитных индукций на участках магнитной системы синхронного двигателя, лишь незначительно возрастая с увеличением значений этих индукций.

Из графиков зависимостей $F_{M*m} = f(D_{1*})$ (рис. 2–5, б) также видно, что в зоне максимума данной функции рассматриваемые кривые достаточно пологие. Это значит, что переход от расчетного значения диаметра расточки статора $D'_1 = D_{1*}D_{1н}$ к его стандартному значению D_1

практически не скажется на оптимальности двигателя в целом.

Для удобства оценки влияния числа пар полюсов двигателя на оптимальные значения D_{1*m} , $B_{\delta m}$ и F_{M*m} на рис. 6–8 графически представлены зависимости $D_{1*m} = f(p)$, $B_{\delta m} = f(p)$, $F_{M*m} = f(p)$, которые достаточно наглядно показывают влияние числа пар полюсов синхронного явнополюсного двигателя, во-первых, на его оптимальную поперечную геометрию и, во-вторых, на функциональный множитель F_{M*m} , характеризующий степень использования активных материалов двигателя. Зависимости на рис. 6–8 рассчитаны и построены для следующих значений магнитных индукций в зубцах и в сердечнике статора двигателя $B_{31} = 1.6$ Тл, $B_{c1} = 1.3$ Тл.

Хотя на практике синхронные явнополюсные двигатели в двухполюсном исполнении не изготавливаются, для получения общей картины расчет выполнен для числа пар полюсов синхронного двигателя от 1 до 5.

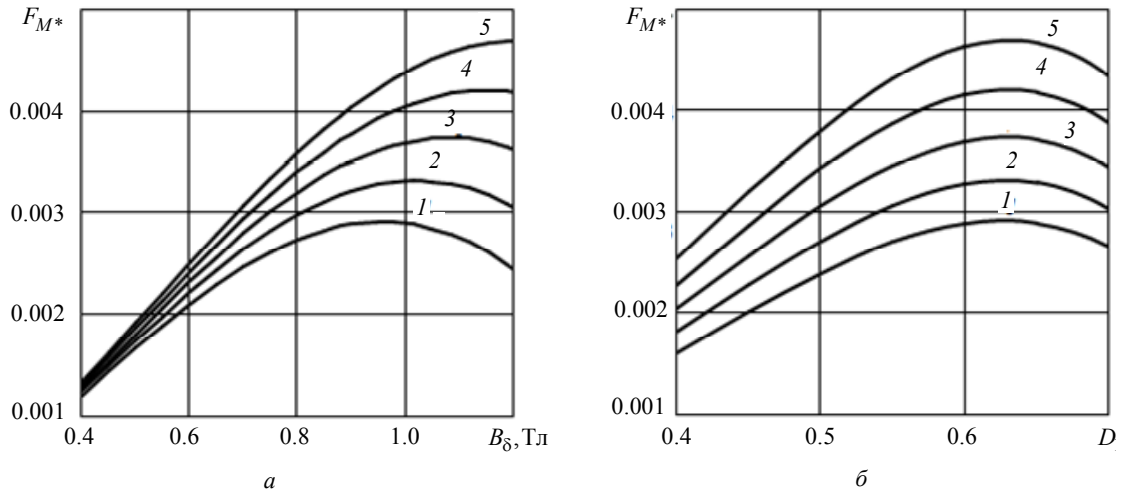


Рис. 4

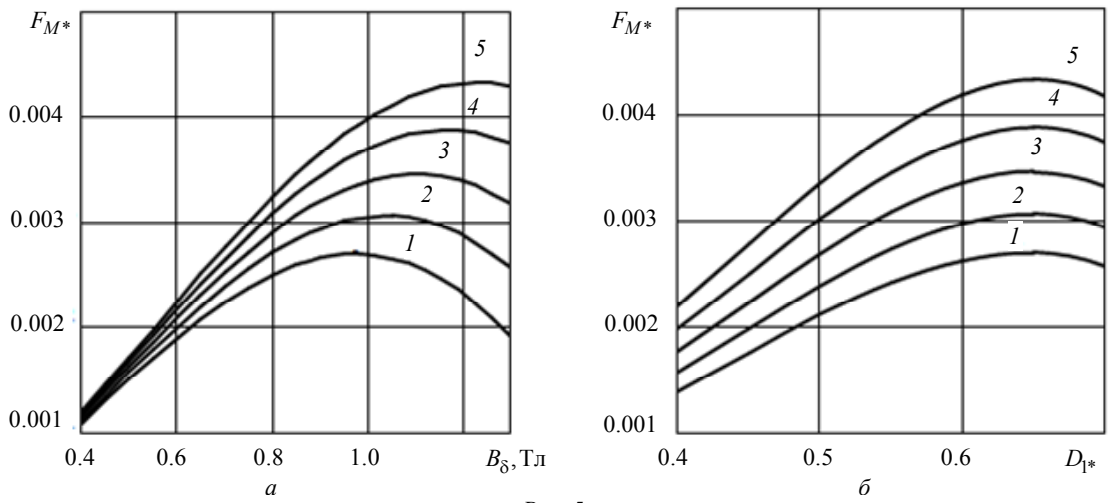


Рис. 5

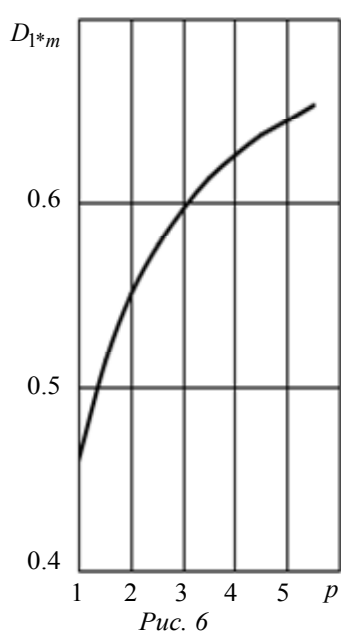


Рис. 6

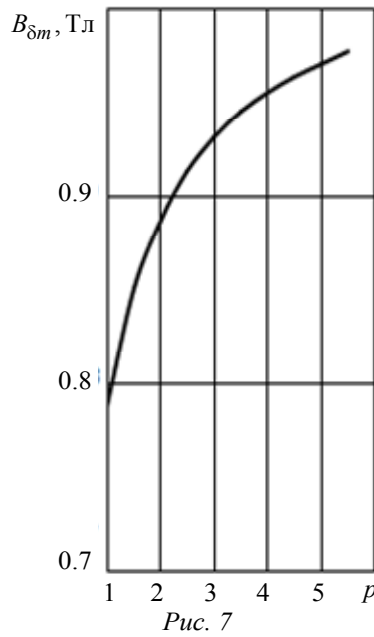


Рис. 7

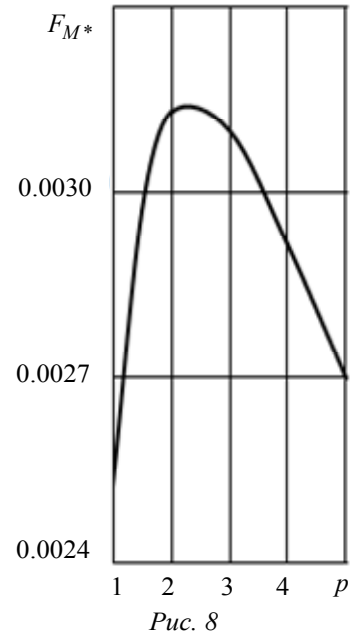


Рис. 8

В частности, из рис. 6 видно, что увеличение числа пар полюсов p имеет своим следствием монотонное повышение оптимального значения

D_{1^*m} относительного диаметра расточки статора и, как следствие этого, сопряжено с возрастанием полюсного деления статора, а соответственно, и

ротора, исключая тем самым возможные сложности, связанные с проектированием обмотки возбуждения, для размещения которой было бы достаточно места в междуполюсном пространстве.

Точно так же при увеличении числа пар полюсов p двигателя монотонно возрастает оптимальное значение $B_{\delta m}$ магнитной индукции в воздушном зазоре (рис. 7).

Что же касается влияния числа пар полюсов p двигателя на оптимальное значение F_{M^*m} функционального множителя F_{M^*} , то оно оказывается неоднозначным (рис. 8). Двухполюсный синхронный явнополюсный двигатель имеет низкое значение F_{M^*m} . В четырехполюсном исполнении синхронный двигатель приобретает максимальное значение F_{M^*m} , и дальнейшее повышение числа пар полюсов двигателя сопровождается монотонным уменьшением F_{M^*m} . Таким образом, в синхронных явнополюсных двигателях повышение числа полюсов приводит к некоторому ухудшению использования материалов в объеме активного ядра.

p	Z_1	$B_{\delta m}$, Тл	D_{1^*m}	F_{M^*m}
2	24	1.1180	0.5564	5.0407
	36	1.1185	0.5563	5.0379
	48	1.1187	0.5562	5.0369
3	36	1.1700	0.6024	4.9555
	48	1.1701	0.6024	4.9546
	60	1.1702	0.6024	4.9542
4	48	1.1992	0.6305	4.6376
	60	1.1993	0.6305	4.6373
	72	1.1993	0.6305	4.6371
5	60	1.2181	0.6496	4.2843
	72	1.2181	0.6496	4.2841
	84	1.2181	0.6496	4.2840

Для оценки влияния числа зубцов (или пазов) статора Z_1 на оптимальные значения D_{1^*m} и $B_{\delta m}$, а также на функциональный множитель F_{M^*m} снова воспользуемся выражением (6) с учетом (5). Расчет выполнен при $B_{\delta 1} = 2$ Тл, $B_{\delta 1} = 1.7$ Тл. Из представ-

ленных в таблице данных видно, что увеличение числа зубцов Z_1 практически не оказывает влияния ни на один из перечисленных параметров.

В частности, при $p = 2$ и 3 магнитная индукция $B_{\delta m}$ незначительно возрастает, а при бóльших значениях числа p магнитная индукция $B_{\delta m}$ остается постоянной. Оптимальное значение диаметра расточки статора D_{1^*m} слегка возрастает в двухполюсных двигателях, а в дальнейшем остается постоянным. Функциональный множитель с увеличением числа полюсов снижается, а при фиксированном числе полюсов двигателя возрастание числа зубцов статора имеет своим следствием некоторое снижение значений F_{M^*m} .

Из материала, изложенного в статье, следует, что:

1. Существуют оптимальные значения диаметра расточки статора и магнитной индукции в воздушном зазоре, обеспечивающие наилучшее использование активных материалов двигателя относительно электромагнитного момента.

2. Составлено выражение для функционального множителя, описывающего оптимальную геометрию синхронного явнополюсного двигателя.

3. Увеличение магнитных индукций в зубцах и сердечнике статора сопровождается повышением оптимального значения магнитной индукции в воздушном зазоре, улучшением использования активных материалов двигателя и практически не влияет на относительное значение оптимального диаметра расточки статора.

4. С увеличением числа пар полюсов двигателя возрастают оптимальные значения оптимального диаметра расточки статора и магнитной индукции в воздушном зазоре, но при этом ухудшается использование активных материалов двигателя.

5. Число пазов статора практически не влияет на технико-экономические показатели двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. Абдуллин Д. Ш., Бутылин И. А., Ваганов М. А. Особенности синхронного неявнополюсного генератора при учете активного сопротивления обмотки статора // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2017. № 2. С. 53–60.

D. S. Abdullin, I. A. Butilin, M. A. Vaganov
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

OPTIMAL CROSS GEOMETRY OF SYNCHRONOUS SALIENT POLE MOTORS

The mathematical model design of synchronous salient pole motor, letting unambiguous way to determine the optimal values of the bore diameter of the stator of the machine and its magnetic induction, thereby providing better utilization of the active materials of the engine.

The relative diameter of the bore of the stator, the magnetic induction in the air gap, the magnetic induction in the teeth and yokes of the core, the functional factor, the relative length of the steel package of the stator, the electromagnetic torque