

УДК 621.313

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

Асинхронный двигатель с фазным ротором и его оптимальная поперечная геометрия

Анализируется влияние перегрузочной способности двигателя на параметрический множитель, значение которого учитывается при определении основных размеров машины. Значение параметрического множителя меняется незначительно при изменении перегрузочной способности в пределах, характерных для большинства общепромышленных двигателей. Для получения более высоких значений перегрузочной способности предлагается понижать номинальное скольжение. Составлено выражение, связывающее номинальное и критическое скольжения и перегрузочную способность асинхронного двигателя. Выполнено исследование влияния относительной длины пакета стали статора с фазным ротором на его оптимальную поперечную геометрию. Изменение относительной длины незначительно сказывается на оптимальных значениях диаметра расточки статора и магнитной индукции в воздушном зазоре. При увеличении относительной длины пакета стали статора значение функционального множителя, а следовательно, и электромагнитного момента возрастают независимо от числа полюсов двигателя. Результаты расчета достаточно хорошо согласуются с данными, полученными на основе анализа технической информации общепромышленных асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором.

Относительный диаметр расточки статора, магнитная индукция в воздушном зазоре, параметрический множитель, функциональный множитель, фазный ротор, прямоугольные и овальные пазы статора, число полюсов, число пазов

В [1]–[4] дано выражение для электромагнитного момента трехфазного асинхронного двигателя

$$M_{\text{эм}} = \frac{m_1 U_1^2}{\omega_1}, \quad \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}, \quad c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m}, \quad (1)$$

где m_1 , U_1 – число фаз обмотки статора и фазное напряжение; ω_1 – синхронная угловая скорость вращения; f_1 – частота напряжения сети; p – число пар полюсов двигателя; c_1 – коэффициент, учитывающий падение напряжения на полном сопротивлении фазы обмотки статора; x_1, x_m – индуктивные сопротивления обмотки статора и взаимной индукции обмоток статора и ротора асинхронного двигателя.

При критическом скольжении ротора $s_m = c_1 r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}$, где r_1 , x_1 и r_2' , x_2' – активные и индуктивные сопротивления соответственно обмотки статора и приведенной к обмотке статора обмотки ротора; электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$, определяемый первым из выражений (1), имеет максимально возможное для данного двигателя значение, определяемое следующим выражением:

$$M_{\text{эм max}} = \frac{m_1 U_1^2}{2c_1 \omega_1} \frac{1}{r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (2)$$

которое, как это видно из (2), не зависит от приведенного активного сопротивления обмотки ротора r_2' .

Перегрузочная способность асинхронного двигателя k_M , или кратность его максимального электромагнитного момента $M_{\text{эм max}}$, представляет собой отношение данного максимального электромагнитного момента к номинальному значению электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм. н}}$, определяемому выражением (1) после подстановки в него номинального скольжения s_H , и тогда получим [5]–[8]:

$$k_M = \frac{M_{\text{эм max}}}{M_{\text{эм. н}}} = \frac{(r_1 + c_1 r_2' / s_H)^2 + (x_1 + x_2')^2}{2c_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right] \frac{r_2'}{s_H}}. \quad (3)$$

Разделим числитель и знаменатель выражения (3) на r_1^2 , тогда все слагаемые числителя и знаменателя окажутся безразмерными, что суще-

ственно упростит сравнение полученных относительных значений между собой. После указанного деления и несложных преобразований получим следующее выражение:

$$k_M = \frac{[1+c_1r_2'/(r_1s_H)]^2 + [(x_1+x_2')/r_1]^2}{2\left(1+\sqrt{1+[(x_1+x_2')/r_1]^2}\right)c_1r_2'/(r_1s_H)}. \quad (4)$$

В асинхронных общепромышленных двигателях номинальное значение скольжения s_H ротора двигателя, определяющее номинальное значение его электромагнитного момента, находится в пределах 0.005...0.050, т. е. существенно меньше единицы, причем меньшие значения, как правило, соответствуют двигателям большей мощности. Поскольку активное сопротивление обмотки статора r_1 и приведенное активное сопротивление обмотки ротора r_2' имеют числовые значения практически одного порядка, то при условии $s_H = 0.005...0.050$ и $c_1 = 1.03...1.10$ с очевидностью можно утверждать, что будет справедливо неравенство $c_1r_2'/(r_1s_H) \gg 1$.

Введем два вспомогательных обозначения: $(x_1+x_2')/r_1 = x_{K*}$; $c_1r_2'/r_1 = r_*$, и тогда выражение (4) примет вид

$$k_M = \frac{(r_*/s_H)^2 + x_{K*}^2}{2\left[1+\sqrt{1+x_{K*}^2}\right]r_*/s_H}.$$

В этом выражении также будет справедливо неравенство $c_1r_2'/(r_1s_H) \gg x_{K*}$, при учете которого рассматриваемое выражение примет еще более простой вид:

$$k_{M s_H} = r_* / \left[2\left(1+\sqrt{1+x_{K*}^2}\right)\right]. \quad (5)$$

Преобразуем выражение (5) с учетом обозначений x_{K*} , r_* , и тогда $k_{M s_H} = \frac{1}{2} c_1 r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1+x_2')^2}$.

Поскольку $c_1r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1+x_2')^2}$ представляет собой критическое скольжение s_m , при котором асинхронный двигатель развивает максимальный электромагнитный момент, то окончательно получим

$$k_{M s_H} = \frac{1}{2} s_m, \quad (6)$$

т. е. произведение перегрузочной способности асинхронного двигателя на его номинальное скольжение численно равно половине критического скольжения рассматриваемого асинхронного двигателя.

В [9]–[11], на базе выражения (1) было получено принципиально новое выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, в которое заложена возможность проектирования асинхронного двигателя с оптимальной продольно-поперечной геометрией, обеспечивающей наилучшее использование материалов в объеме активного ядра двигателя относительно его электромагнитного момента, и в свернутом виде это новое выражение для электромагнитного момента асинхронного двигателя представлено в форме произведения нескольких сомножителей:

$$M_{\text{эм. н}} = k_F D_{\text{н}}^5 F_{M*} F_{\Pi} s_H, \quad (7)$$

где в состав коэффициента k_F входят константы, а также величины, числовые значения которых могут быть рассчитаны заранее или уже заранее известны; $D_{\text{н}}$ – неизвестный наружный диаметр пакета стали статора двигателя; F_{M*} – функциональный сомножитель, определяющий степень использования активных материалов двигателя относительно его электромагнитного момента; F_{Π} – параметрический сомножитель, который зависит от перегрузочной способности двигателя и отношения активных сопротивлений обмоток статора и ротора; s_H – номинальное скольжение ротора двигателя.

В выражении (7) скольжение ротора s_H может быть выбрано из условия (6) для заданного значения перегрузочной способности двигателя k_M .

Выражение для параметрического сомножителя F_{Π} выглядит следующим образом:

$$F_{\Pi} = \frac{1}{2c_1^2 k_M (k_M - \sqrt{k_M^2 - 1})} \sqrt{\frac{r_1}{r_2'}},$$

где коэффициент c_1 определен ранее, k_M – перегрузочная способность двигателя; r_1 – активное сопротивление обмотки статора; r_2' – приведенное активное сопротивление обмотки ротора.

Оценим влияние перегрузочной способности асинхронного двигателя k_M на числовое значение его параметрического сомножителя. Подобный анализ позволит выяснить степень зависимости основных размеров асинхронного двигателя от кратности его максимального момента, так как в соответствии с выражением (7) значение параметрического сомножителя должно учитываться

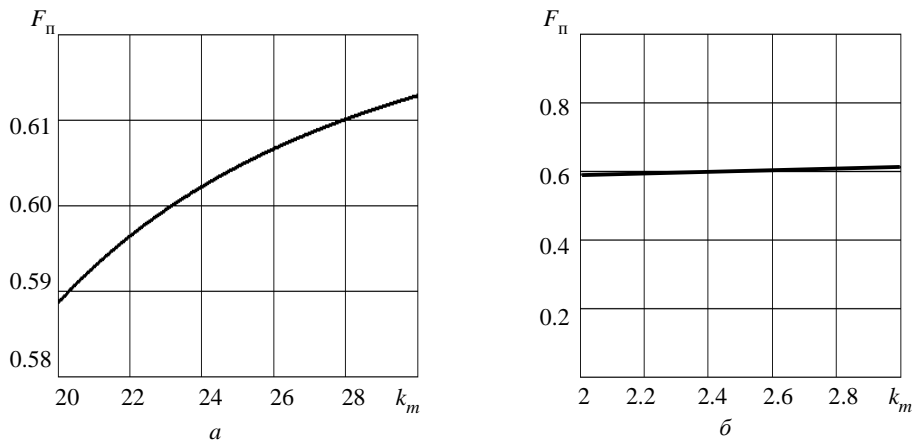


Рис. 1

при определении наружного диаметра пакета стали статора D_{1H} .

Зависимость $F_{\Pi} = f(k_M)$ при изменении перегрузочной способности k_M в интервале от 2 до 3 (рис. 1, а) в увеличенном масштабе для удобства оценки влияния перегрузочной способности k_M асинхронного двигателя на числовое значение параметрического сомножителя F_{Π} , а на рис. 1, б – в нормальном масштабе.

Из рис. 1 видно, что в указанном диапазоне значений коэффициента k_M изменение значения параметрического сомножителя составляет менее 5%. И, как видно из рис. 1, б, зависимость $F_{\Pi} = f(k_M)$ представляет собой практически горизонтальную прямую. Из этого следует, что в самой математической модели заложена невозможность получения более высоких значений перегрузочной способности двигателя, если не предпринимать каких-либо дополнительных действий в направлении повышения кратности его максимального момента.

Следует также иметь в виду, что анализ общепромышленных асинхронных двигателей серии 4А, 5А, ..., РА АИР показывает, что значение перегрузочной способности данных двигателей меняется в небольших пределах, как правило в интервале от 2 до 3 при всех числах пар полюсов двигателей той или иной рассматриваемой серии. Опыт эксплуатации общепромышленных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором показывает, что, в принципе, нет особой практической необходимости иметь двигатели с более высокой перегрузочной способностью.

В тех же случаях, когда двигатель все же должен обеспечить большее значение перегрузочной способности, целесообразно при его проектировании в соответствии с (6) снизить значение номинального скольжения s_H ротора.

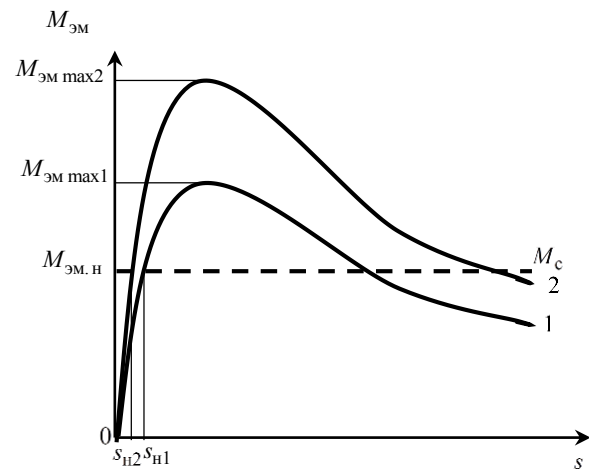


Рис. 2

Снижение номинального скольжения ротора s_H двигателя будет сопровождаться при его фиксированном электромагнитном моменте в соответствии с выражением (7) возрастанием наружного диаметра пакета стали статора двигателя D_{1H} , как показывают предшествующие исследования с сохранением его оптимальной поперечной геометрии. Возрастет жесткость механической характеристики двигателя и его максимальный электромагнитный момент $M_{ЭМ \max 2} > M_{ЭМ \max 1}$, но, что вполне естественно, при этом снижается степень использования активных материалов двигателя, так как новая механическая характеристика двигателя расположится над прежней (рис. 2).

Таким образом, в связи с практическим постоянством значения параметрического сомножителя F_{Π} относительно кратности k_M максимального момента двигателя, нет особого смысла задавать при проектировании нового асинхронного двигателя значение k_M .

Во всех предшествующих работах исследования общепромышленных асинхронных двигателей с оптимальной поперечной геометрией проводились применительно к асинхронным двигателям с короткозамкнутым ротором. Для обобщения полученных результатов целесообразно выполнить аналогичное исследование для асинхронных двигателей с фазным ротором.

Активные сопротивления фазы обмотки статора и фазы приведенной фазной обмотки ротора определяются выражениями

$$r_1 = \frac{2W_1 l_{1в.ср} k_{\vartheta 1}}{\gamma_1 a_1 q_{a1}}, \quad r_2' = \frac{4m_1 (W_2 k_{об2})^2 l_{2в.ср} k_{\vartheta 2}}{\gamma_2 a_2 q_{a2}},$$

где W_1, W_2 – число последовательно соединенных витков обмоток статора и ротора соответственно; m_1 – число фаз обмотки статора (в большинстве случаев фазный ротор имеет трехфазную обмотку); $l_{1в.ср}$ и $l_{2в.ср}$ – средние длины витков обмоток статора и ротора соответственно; $k_{\vartheta 1}$ и $k_{\vartheta 2}$ – температурные коэффициенты, учитывающие влияние температуры на сопротивление материалов обмоток статора и ротора соответственно; γ_1 и γ_2 – удельные электропроводности материалов обмоток статора и ротора соответственно; a_1 и a_2 – числа параллельных ветвей обмоток статора и ротора соответственно; q_{a1} и q_{a2} – сечения проводников обмоток статора и ротора соответственно; $k_{об2}$ – обмоточный коэффициент, учитывающий структуру обмоток ротора.

Следует иметь в виду, что в асинхронных двигателях с фазным ротором в качестве материала обмотки ротора используется медный провод, как и для обмотки статора.

Средние длины витков обмоток статора и ротора определяются следующими выражениями: $l_{1в.ср} = 2(l_1 + l_{л1})$ и $l_{2в.ср} = 2(l_2 + l_{л2})$, где l_1, l_2 и $l_{л1}, l_{л2}$ – длины пакетов стали статора и ротора, а также длины лобовых частей этих обмоток соответственно. В большинстве случаев длины пакетов стали статора и ротора одинаковы $l_2 = l_1$.

Основные элементы фазных обмоток статора и ротора – это катушки, которые формируются в зависимости от мощности и силы тока из проводников кругового (при малых мощностях и токах) или прямоугольного сечения при значительных мощностях и больших токах.

В асинхронных двигателях с фазным ротором обмотка ротора выполняется, как правило, из жестких катушек (только при небольших мощностях применяется всыпная обмотка из проводников кругового сечения), формируемых из провода прямоугольного сечения. При этом средняя длина витка фазной обмотки ротора $l_{2в.ср}$ складывается из двух прямолинейных пазовых $l_{п2}$ и двух изогнутых лобовых $l_{л2}$ частей этого витка, т. е. $l_{2в.ср} = 2(l_{п2} + l_{л2})$. В свою очередь, в общем случае, прямолинейная часть $l_{п2} = k_{пр2} l_2$, где l_2 – длина пакета стали ротора, а что касается коэффициента $k_{пр2}$, то предполагается, что он должен был учитывать прямолинейную часть проводника, но за пределами пакета стали ротора. В более поздних изданиях учебников по проектированию и расчету электрических машин [4] указанный прямолинейный участок включается непосредственно в состав лобовой части витка, поэтому в данном случае и в дальнейшем будем принимать коэффициент $k_{пр2} = 1$.

Длина лобовой части жесткой катушки фазной обмотки ротора $l_{л2} = 1.3 b_{ср2} + h_{п2} + 0.050$ [4]. В этом выражении величина $h_{п2}$ представляет собой высоту паза ротора и учитывает двухслойность жестких катушек обмотки ротора, которая закладывается в процессе их изготовления. Числовая добавка 0.050 (имеется в виду 50 мм, так как все линейные размеры принимаются в метрах) учитывает прямолинейные участки лобовой части. Величина $b_{ср2}$ характеризует среднюю ширину жесткой катушки фазной обмотки ротора и определяется выражением

$$b_{ср2} = \beta_2 \frac{\pi(D_{2н} - h_{п2})}{2p},$$

где $D_{2н}$ – наружный диаметр пакета стали ротора; коэффициент $\beta_2 = 0.8 \dots 0.857$ учитывает укорочение шага фазной обмотки ротора. Дробь в данном выражении определяет среднее полюсное деление ротора по середине высоты паза ротора.

Обмотка статора может быть всыпной, выполненной из мягких катушек, формируемых из медного обмоточного провода кругового сечения, или жесткой, выполненной из катушек, формируемых из медного обмоточного провода прямо-

угольного сечения. Всыпная обмотка применяется при малых мощностях в пределах до 10...15 кВт. Для насыпной обмотки длина одной лобовой части мягкой катушки обмотки статора $l_{л1} = k_p \beta_1 \tau_{1ср} + h_{п1} + 0.015$, где числовая добавка в 0.015 (имеется в виду 15 мм) учитывает прямолинейные участки лобовой части.

В выражении для $l_{л1}$ безразмерный коэффициент $k_p = 1.16 + 0.14 p$, где p – число пар полюсов двигателя [4]. Коэффициент $\beta_1 = 0.8...0.857$ учитывает укорочение шага обмотки ротора. Величина $\tau_{1ср} = \pi(D_{1н} + h_{п1})/(2p)$ характеризует среднее полюсное деление статора по середине высоты паза статора. Добавочное слагаемое вида $h_{п1}$ представляет собой высоту паза статора. И тогда окончательно

$$l_{л1} = k_p \beta_1 \frac{\pi(D_{1н} + h_{п1})}{2p} + h_{п1} + 0.015.$$

Высота паза статора $h_{п1}$ определяется выражением [5]

$$h_{п1} = \frac{1}{2} \left(D_{1н} - D_1 - 2h_{ш1} - \frac{B_{\delta} D_1}{p k_{c1} B_{c1}} \right),$$

где $D_{1н}$, D_1 – наружный и внутренний диаметры пакета стали статора соответственно; $h_{ш1}$ – высота шлица паза статора; B_{δ} – амплитуда магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя; B_{c1} – магнитная индукция в сердечнике статора двигателя; $k_{c1} = 0.97$ – коэффициент заполнения пакета статора сталью.

Для обмотки статора, выполненной из жестких катушек, сформированных из проводников прямоугольного сечения, длина одной лобовой части $l_{л1}$ определяется выражением, аналогичным для фазной обмотки фазного ротора, а именно $l_{л1} = 1.3 b_{ср1} + h_{п1} + 0.050$. В этом выражении величина $h_{п1}$ представляет собой высоту паза статора и учитывает двухслойность жестких катушек обмотки статора, которая закладывается в процессе их изготовления. Числовая добавка 0.050 (имеется в виду 50 мм) учитывает прямолинейные участки лобовой части. Величина $b_{ср1}$ характеризует среднюю ширину жесткой катушки обмотки статора и определяется выражением

$$b_{ср1} = \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p},$$

где D_1 – диаметр расточки статора; $\beta_1 = 0.8...0.857$ учитывает укорочение шага обмотки статора. Дробь в данном выражении определяет среднее полюсное деление статора по середине высоты паза статора.

Для приведенного активного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора асинхронного двигателя имеем следующее выражение:

$$r_2' = \frac{4m_1 (W_1 k_{об1})^2 k_{\gamma 2}}{\gamma_2 Q_{п2} k_{\tau 2}} \left[l_2 + \frac{\pi D_k}{Z_2} \frac{1}{\sin(\pi p / Z_2)} \right],$$

$$Q_{п2} = k_{п2} D_{2н}^2,$$

где Z_2 – число пазов ротора; $k_{п2}$ – коэффициент, учитывающий конфигурацию паза ротора [5] и определяющий площадь паза ротора; $D_{2н}$ – наружный диаметр пакета стали ротора. В первом из этих выражений сомножитель, стоящий в квадратных скобках, учитывает среднюю длину полувитка короткозамкнутой обмотки ротора, т. е. длину стержня беличьей клетки в пределах пакета стали ротора, а также длину сегмента короткозамыкающего кольца, относящегося к данному стержню. И тогда второе слагаемое в квадратных скобках представляет собой по существу лобовую часть короткозамкнутой обмотки ротора $l_{л2}$ кз.

В табл. 1 для удобства использования представлены выражения, определяющие длины лобовых частей обмоток статора и ротора асинхронных двигателей в зависимости от типа обмотки, а именно для статора с насыпной обмоткой и с обмоткой из жестких катушек, а также для ротора с насыпной обмоткой и с обмоткой из жестких катушек и, кроме того, с короткозамкнутой обмоткой.

Во всех предшествующих статьях рассматривались только исключительно асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором, применительно к которому был выполнен анализ оптимальной поперечной геометрии двигателя. В частности, катушки фазной обмотки ротора в сравнении с короткозамкнутой обмоткой имеют несколько большую длину лобовых частей, что, вполне естественно, должно оказать влияние, хотя, может быть, и не очень значительное, на параметры, характеризующие оптимальную поперечную геометрию

Таблица 1

Тип обмотки	Статор	Ротор
Всыпная	$l_{л1*} = k_p \beta_1 \frac{\pi(D_{1*} + h_{п1*})}{2p} + h_{п1*} + 0.015_*$	$l_{л2*} = k_p \beta_2 \frac{\pi(D_{2н*} - h_{п2*})}{2p} + h_{п2*} + 0.015_*$
Жесткие катушки	$l_{л1*} = 1.3 \beta_1 \frac{\pi(D_{1*} + h_{п1*})}{2p} + h_{п1*} + 0.050_*$	$l_{л2*} = 1.3 \beta_2 \frac{\pi(D_{2н*} - h_{п2*})}{2p} + h_{п2*} + 0.050_*$
Короткозамкнутая	–	$l_{л2 кз*} = \frac{\pi D_{к*}}{Z_2} \frac{1}{\sin(\pi p / Z_2)}$

Таблица 2

Тип обмотки	Статор	Ротор
Всыпная	$l_{л1} = k_p \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p} + h_{п1} + 0.015$	$l_{л2} = k_p \beta_2 \frac{\pi(D_{2н} - h_{п2})}{2p} + h_{п2} + 0.015$
Жесткие катушки	$l_{л1} = 1.3 \beta_1 \frac{\pi(D_1 + h_{п1})}{2p} + h_{п1} + 0.050$	$l_{л2} = 1.3 \beta_2 \frac{\pi(D_{2н} - h_{п2})}{2p} + h_{п2} + 0.050$
Короткозамкнутая	–	$l_{л2 кз} = \frac{\pi D_{к}}{Z_2} \frac{1}{\sin(\pi p / Z_2)}$

асинхронного двигателя. При учете обозначений для лобовых частей обмоток статора и ротора асинхронных двигателей, приведенных в табл. 1, выражение для функционального множителя F_{M*} [9]–[11]

$$F_{M*} = \frac{D_{1*}^4 I_{1*}^2 B_{\delta}^2 \sqrt{k_{п1} k_{п2}}}{\sqrt{\left(k_{л1} l_{1*} + k_{\beta 1} \frac{D_{1*}}{p}\right) \left(l_{1*} + \frac{\pi D_{1*} k_j}{z_2 \sin \frac{\pi p}{z_2}}\right)}} \frac{1}{p}$$

следует переписать в следующей форме:

$$F_{M*} = \frac{D_{1*}^4 I_{1*}^2 B_{\delta}^2 \sqrt{k_{п1} k_{п2}}}{\sqrt{(l_{1*} + l_{л1*})(l_{1*} + l_{л2*})}} \frac{1}{p}; \tag{8}$$

$$F_{M*} = \frac{D_{1*}^4 I_{1*}^2 B_{\delta}^2 \sqrt{k_{п1} k_{п2}}}{\sqrt{(l_{1*} + l_{л1*})(l_{1*} + l_{л2 кз*})}} \frac{1}{p}.$$

Первое выражение относится к асинхронным двигателям с фазным ротором, а второе – с короткозамкнутым. В этих выражениях величины $l_{л1*}$, $l_{л2*}$, $l_{л2 кз*}$ записаны в относительных единицах и должны определяться выражениями, представленными в табл. 2.

Выражения для лобовых частей катушек обмоток статора и ротора содержат числовые значения слагаемых, которые также записаны в относительных единицах (имеются в виду 0.015* и 0.050*). При выполнении расчетов с использованием выражений (8) расчет проводится в два эта-

па. На первом этапе значения 0.015* и 0.050* принимаются равными нулю. После определения наружного диаметра пакета стали статора $D_{1н}$ в абсолютных значениях числовые добавки 0.015 и 0.050 переводятся в относительные единицы делением их на $D_{1н}$ (в миллиметрах), которые затем подставляются в соответствующие выражения табл. 2 с последующим уточнением оптимальных величин, характеризующих поперечную геометрию двигателя.

В частности, было рассмотрено влияние длины пакета стали статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором на его оптимальную поперечную геометрию, которая характеризуется относительным оптимальным диаметром расточки статора $D_{1*м}$ и оптимальным значением магнитной индукции в воздушном зазоре $B_{\delta м}$. Также рассматривалось влияние длины пакета стали статора на функциональный множитель $F_{M*м}$, который непосредственно характеризует степень использования активных материалов двигателя относительно его электромагнитного момента.

Определяющим в асинхронных двигателях не зависимо от конструктивной схемы ротора является функциональный множитель F_{M*} , структурная схема которого одинакова для асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным роторами с единственным отличием в содержательной части самой структурной схемы, связанным с описанием лобовых частей фазной обмотки ротора.

В асинхронных двигателях с фазным ротором обмотка ротора выполняется, как правило, из жестких катушек (только при небольших мощностях применяется вьспная обмотка из проводников кругового сечения), формируемых из провода прямоугольного сечения. При этом средняя длина витка фазной обмотки ротора l_{cp2} складывается из прямолинейных пазовых частей $l_{п2}$ и изогнутых лобовых частей $l_{л2}$ этого витка, т. е. $l_{cp2} = 2(l_{п2} + l_{л2})$. При этом условии длина одной лобовой части жесткой катушки фазной обмотки ротора $l_{л2} = k_p \beta_2 \tau_{2cp} + h_{п2} + 0.015$, где числовая добавка в 0.015 (имеется в виду 15 мм) учитывает прямолинейные участки лобовой части. В выражении для $l_{л2}$ коэффициент $k_p = 1.16 + 0.14 p$, p – число пар полюсов двигателя [4]. Коэффициент $\beta_2 = 0.8 \dots 0.857$ учитывает укорочение шага обмотки ротора. Величина τ_{2cp} характеризует среднее полюсное деление ротора по середине высоты паза ротора и определяется выражением $\tau_{2cp} = \pi(D_{2н} - h_{п2}) / (2p)$. Добавочное слагаемое вида $h_{п2}$ (это – высота паза ротора) учитывает двухслойность жестких катушек обмотки ротора, которая закладывается в процессе их изготовления. И тогда окончательно

$$l_{л2} = k_p \beta_2 \frac{\pi(D_{2н} - h_{п2})}{2p} + h_{п2} + 0.015.$$

Высота паза ротора $h_{п2}$ определяется выражением из [9]

$$h_{п2} = \frac{1}{2} \left(D_{2н} - D_2 - 2h_{ш2} - \frac{B_{\delta} D_{2н}}{pk_{c2} B_{c2}} \right),$$

где $D_{2н}$, D_2 – наружный и внутренний диаметры пакета стали ротора соответственно; $h_{ш2}$ – высота шлица паза ротора; B_{δ} – амплитуда магнитной индукции в воздушном зазоре двигателя; B_{c2} – магнитная индукция в сердечнике ротора; $k_{c2} = 0.97$ – коэффициент заполнения пакета ротора сталью.

Приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора

$$r_2' = \frac{4m_1 k_{\theta 2}}{\gamma_2 k_{\Gamma 2} Q_{п2}} (W_1 k_{об1})^2 l_{cp2},$$

где $k_{\theta 2}$ – температурный коэффициент, учитывающий увеличение сопротивления материала обмотки при ее нагревании; γ_2 – удельная электропроводность материала обмотки ротора; $k_{\Gamma 2}$ – коэффициент заполнения паза ротора неизолированным проводом; $Q_{п2}$ – площадь пазов ротора, зависящая от формы этих пазов [9]; W_1 и $k_{об1}$ – число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора и ее обмоточный коэффициент соответственно.

Для оценки влияния длины пакета стали статора l_1 асинхронного двигателя с фазным ротором на его оптимальную поперечную геометрию воспользуемся выражением для функционального сомножителя F_{M*} из [9], который преобразуется к виду (8).

Необходимо оценить влияние длины пакета стали статора асинхронного двигателя с фазным ротором на оптимальную поперечную геометрию двигателя. Выражение для функционального сомножителя, представленное в [1], применяется для двигателей с короткозамкнутым ротором. Необходимо преобразовать данное выражение для двигателя с фазным ротором с учетом конструкции лобовых частей обмотки ротора.

Были определены оптимальные значения относительного диаметра расточки статора D_{1*} и магнитной индукции в воздушном зазоре B_{δ} и соответствующие им оптимальные значения функционального сомножителя F_{m*} . Для общности полученных результатов все расчеты выполнены для двух наборов значений магнитных индукций в стальных участках магнитной цепи асинхронного двигателя, перечисленных в табл. 3. Расчеты выполнялись для двигателей с числом полюсов $2p = 2; 4; 6; 8; 10; 12$, охватывающих большинство стандартных общепромышленных серий асинхронных двигателей.

Таблица 3

Номер набора	B_{c1}	$B_{\delta 1}$	B_{c2}	$B_{\delta 2}$
1	1.5	1.7	1.2	1.7
2	1.8	2	1.5	2

Результаты расчетов для двигателей с овальными пазами на статоре и роторе представлены в табл. 4, а с прямоугольными – в табл. 5.

Таблица 4

2p	Рассчитываемая величина	Номер строки	l _{1*}							
			0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
2	D _{1m*}	1	0.6136	0.6188	0.6221	0.6246	0.6264	0.6278	0.6290	0.6300
		2	0.6090	0.6144	0.6178	0.6203	0.6222	0.6237	0.6249	0.6259
	B _{δm} , Тл	1	0.5146	0.5100	0.5067	0.5043	0.5024	0.5008	0.4995	0.4984
		2	0.6331	0.6271	0.6228	0.6197	0.6172	0.6151	0.6135	0.6120
	F _{m*m} · 10 ⁻³ , Тл ²	1	0.3366	1.0779	2.0324	3.1173	4.2894	5.5228	6.8015	8.1145
		2	0.4955	1.5852	2.9873	4.5806	6.3011	8.1115	9.9879	11.914
4	D _{1m*}	1	0.6310	0.6407	0.6462	0.6500	0.6527	0.6548	0.6565	0.6578
		2	0.6298	0.6399	0.6456	0.6495	0.6523	0.6544	0.6561	0.6575
	B _{δm} , Тл	1	0.8592	0.8430	0.8329	0.8258	0.8205	0.8164	0.8130	0.8103
		2	1.0244	1.0050	0.9929	0.9845	0.9782	0.9733	0.9693	0.9660
	F _{m*m} · 10 ⁻³ , Тл ²	1	0.6231	1.8442	3.3198	4.9355	6.6381	8.3990	10.201	12.033
		2	0.8807	2.6093	4.7006	6.9922	9.4084	11.908	14.467	17.069
6	D _{1m*}	1	0.6643	0.6756	0.6818	0.6858	0.6887	0.6909	0.6926	0.6941
		2	0.6660	0.6774	0.6835	0.6876	0.6905	0.6927	0.6944	0.6958
	B _{δm} , Тл	1	0.9134	0.8990	0.8904	0.8844	0.8800	0.8766	0.8739	0.8716
		2	1.0691	1.0530	1.0434	1.0368	1.0320	1.0282	1.0251	1.0226
	F _{m*m} · 10 ⁻³ , Тл ²	1	0.6168	1.7770	3.1572	4.6571	6.2307	7.8536	9.5111	11.194
		2	0.8551	2.4679	4.3902	6.4813	8.6770	10.942	13.257	15.608
8	D _{1m*}	1	0.6943	0.7055	0.7114	0.7154	0.7182	0.7203	0.7220	0.7234
		2	0.6963	0.7073	0.7133	0.7172	0.7200	0.7222	0.7239	0.7252
	B _{δm} , Тл	1	0.8954	0.8850	0.8788	0.8746	0.8715	0.8690	0.8670	0.8654
		2	1.0461	1.0345	1.0277	1.0230	1.0195	1.0168	1.0146	1.0128
	F _{m*m} · 10 ⁻³ , Тл ²	1	0.5502	1.5638	2.7634	4.0645	5.4287	6.8351	8.2713	9.7294
		2	0.7593	2.1616	3.8235	5.6278	7.5207	9.4732	11.467	13.493
10	D _{1m*}	1	0.7154	0.7260	0.7318	0.7356	0.7383	0.7404	0.7421	0.7434
		2	0.7171	0.7277	0.7334	0.7372	0.7399	0.7420	0.7437	0.7450
	B _{δm} , Тл	1	0.8759	0.8679	0.8632	0.8600	0.8576	0.8557	0.8542	0.8529
		2	1.0239	1.0149	1.0096	1.0060	1.0033	1.0012	0.9995	0.9981
	F _{m*m} · 10 ⁻³ , Тл ²	1	0.4829	1.3591	2.3928	3.5131	4.6875	5.8982	7.1346	8.3900
		2	0.6657	1.8761	3.3057	4.8563	6.4824	8.1596	9.8729	11.613
12	D _{1m*}	1	0.7296	0.7398	0.7453	0.7490	0.7516	0.7537	0.7553	0.7566
		2	0.7310	0.7412	0.7467	0.7504	0.7530	0.7550	0.7567	0.7580
	B _{δm} , Тл	1	0.8628	0.8563	0.8525	0.8498	0.8479	0.8463	0.8451	0.8440
		2	1.0093	1.0020	0.9977	0.9947	0.9925	0.9908	0.9894	0.9882
	F _{m*m} · 10 ⁻³ , Тл ²	1	0.4286	1.1969	2.1012	3.0806	4.1071	5.1653	6.2461	7.3434
		2	0.5909	1.6519	2.9016	4.2562	5.6764	7.1410	8.6372	10.157

Из табл. 4 и 5 видно, что независимо от формы пазов статора и ротора изменение относительной длины пакета стали статора незначительно влияет на оптимальные значения относительного диаметра расточки статора и магнитной индукции в воздушном зазоре. При увеличении числа полюсов оптимальные значения относительного диаметра расточки статора и магнитной индукции в воздушном зазоре незначительно изменяются. Хотя следует отметить, что наблюдается незначительный максимум указанных величин в зоне 4 и 6 полюсов. Также видно, что увеличение относительной длины сопровождается возрастанием функционального множителя независимо от числа полюсов, а следовательно, и момент двигателя существенно возрастает. Максимальное значение функционального множителя

наблюдается для четырехполюсных двигателей, при дальнейшем увеличении числа полюсов значение функционального множителя уменьшается до 2p = 12 включительно. Полученные результаты согласуются с данными, представленными в [10], где аналогичные исследования проводились для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.

При сравнении полученных результатов для двигателей с овальными и прямоугольными пазами на статоре и роторе было выявлено, что в целом значение функционального множителя, а значит, и электромагнитного момента больше для двигателей с овальной формой пазов при прочих равных условиях.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы:

Таблица 5

2p	Рассчитываемая величина	Номер строки	l_{1*}							
			0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00
2	D_{1m*}	1	0.6246	0.6293	0.6324	0.6346	0.6363	0.6376	0.6387	0.6396
		2	0.6195	0.6243	0.6275	0.6298	0.6315	0.6329	0.6340	0.6349
	$B_{\delta m}$, Тл	1	0.5522	0.5476	0.5443	0.5418	0.5399	0.5383	0.5370	0.5359
		2	0.6792	0.6731	0.6688	0.6656	0.6631	0.6611	0.6594	0.6579
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$, Тл ²	1	0.3171	1.0167	1.9184	2.9442	4.0526	5.2194	6.4292	7.6717
		2	0.4601	1.4737	2.7793	4.2635	5.8669	7.5545	9.3039	11.100
4	D_{1m*}	1	0.6306	0.6404	0.6462	0.6501	0.6529	0.6551	0.6569	0.6583
		2	0.6263	0.6372	0.6436	0.6478	0.6510	0.6534	0.6553	0.6568
	$B_{\delta m}$, Тл	1	0.8702	0.8537	0.8433	0.8360	0.8304	0.8261	0.8226	0.8198
		2	1.0132	0.9928	0.9801	0.9712	0.9646	0.9594	0.9553	0.9518
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$, Тл ²	1	0.4093	1.2107	2.1789	3.2388	4.3556	5.5106	6.6926	7.8943
		2	0.5462	1.6174	2.9133	4.3334	5.8309	7.3805	8.9669	10.580
6	D_{1m}	1	0.6204	0.6407	0.6518	0.6590	0.6642	0.6682	0.6713	0.6738
		2	0.6162	0.6376	0.6493	0.6569	0.6624	0.6666	0.6699	0.6725
	$B_{\delta m}$, Тл	1	0.7262	0.7032	0.6908	0.6827	0.6769	0.6726	0.6691	0.6663
		2	0.8268	0.7992	0.7844	0.7748	0.7680	0.7629	0.7588	0.7556
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$, Тл ²	1	0.2447	0.7013	1.2441	1.8343	2.4541	3.0928	3.7476	4.4118
		2	0.3198	0.9171	1.6281	2.4017	3.2145	4.0538	4.9119	5.7839
8	D_{1m*}	1	0.6134	0.6387	0.6522	0.6610	0.6674	0.6721	0.6759	0.6789
		2	0.6107	0.6367	0.6506	0.6596	0.6661	0.6710	0.6748	0.6779
	$B_{\delta m}$, Тл	1	0.6273	0.6029	0.5903	0.5823	0.5767	0.5725	0.5692	0.5665
		2	0.7209	0.6920	0.6772	0.6678	0.6612	0.6563	0.6524	0.6494
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$, Тл ²	1	0.1604	0.4502	0.7915	1.1611	1.5485	1.9478	2.3556	2.7697
		2	0.2125	0.5967	1.0495	1.5401	2.0544	2.5847	3.1263	3.6764
10	D_{1m*}	1	0.6112	0.6384	0.6529	0.6624	0.6691	0.6742	0.6783	0.6815
		2	0.6093	0.6370	0.6517	0.6613	0.6681	0.6733	0.6774	0.6807
	$B_{\delta m}$, Тл	1	0.5755	0.5514	0.5392	0.5315	0.5261	0.5220	0.5189	0.5164
		2	0.6650	0.6367	0.6224	0.6134	0.6070	0.6023	0.5986	0.5957
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$, Тл ²	1	0.1183	0.3274	0.5721	0.8363	1.1127	1.3975	1.6881	1.9830
		2	0.1583	0.4381	0.7657	1.1196	1.4899	1.8715	2.2609	2.6562
12	D_{1m*}	1	0.6108	0.6387	0.6536	0.6634	0.6703	0.6756	0.6798	0.6831
		2	0.6094	0.6376	0.6527	0.6625	0.6696	0.6749	0.6791	0.6825
	$B_{\delta m}$, Тл	1	0.5442	0.5208	0.5090	0.5016	0.4964	0.4925	0.4895	0.4871
		2	0.6311	0.6036	0.5898	0.5811	0.5750	0.5705	0.5670	0.5641
	$F_{M*m} \cdot 10^{-3}$, Тл ²	1	0.0937	0.2566	0.4463	0.6508	0.8645	1.0845	1.3089	1.5366
		2	0.1262	0.3455	0.6011	0.8766	1.1647	1.4612	1.7637	2.0706

1. В разработанной математической модели асинхронного двигателя заложена принципиальная невозможность получения значений перегрузочной способности свыше 3. Но, с другой стороны, это предельное значение кратности максимального момента вполне приемлемо для большинства общепромышленных асинхронных двигателей.

2. Получено соотношение между кратностью максимального момента асинхронного двигателя, его номинальным скольжением, с одной стороны, и критическим скольжением, с другой. В частности, произведение перегрузочной способности двигателя на его номинальное скольжение составляет половину критического скольжения. Пользуясь данным соотношением, всегда можно выбрать необходимые значения для номинального и критического скольжений. При этом следует иметь в

виду, что снижение номинального скольжения будет сопровождаться увеличением наружного диаметра пакета стали статора и ухудшением использования активных материалов.

3. Независимо от конструкции ротора асинхронного двигателя:

- изменение относительной длины пакета стали статора слабо влияет на оптимальную поперечную геометрию асинхронного двигателя;

- увеличение относительной длины пакета стали статора сопровождается повышением электромагнитного момента двигателя.

4. Слабое влияние длины пакета стали статора двигателя на его оптимальную поперечную геометрию дает возможность с целью повышения унификации асинхронных двигателей реализовать на одном наружном диаметре пакета стали статора

две-три мощности при сохранении уровня использования активных материалов

5. Наилучшее использование активных материалов относительно электромагнитного момента имеют четырех- и шестиполусные асинхронные двигатели.

Максимальное значение электромагнитного момента достигается при четырех полюсах.

6. Наилучшим образом активные материалы относительно электромагнитного момента используются при овальных пазах на статоре и роторе, что следует учитывать при выборе типа обмотки статора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гольдберг О. Т., Гурин Я. С., Свириденко И. С. Проектирование электрических машин. М.: ГУП, Высш. шк, 2001. 430 с.

2. Постников И. М. Проектирование электрических машин. Киев: Гос. изд-во техн. лит. УССР, 1960. 910 с.

3. Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. Проектирование электрических машин. М.: Энергия, 1969. 632 с.

4. Шуйский В. П. Расчет электрических машин. Л.: Энергия, 1968. 730 с.

5. Проектирование электрических машин: учеб. пособие для вузов / И. П. Копылов, А. Ф. Горяинов, Б. К. Ключков и др.; под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.

6. Вольдек А. И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 839 с.

7. Костенко М. П., Пиотровский Л. М. Электрические машины. Л.: Энергия, 1974. 542 с.

8. Юферов Ф. М. Электрические машины автоматических устройств. М.: Высш. шк., 1988. 475 с.

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

10. 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. № 7. С. 66–73.

11. Основы расчета общепромышленных асинхронных двигателей / М. А. Ваганов, В. Ф. Матюхов, И. А. Пименова, Г. Н. Суменкова // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2014. № 6. С. 55–60.

M. A. Vaganov, Yu. A. Grubman, V. V. Demidova
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

TO THE QUESTION ABOUT THE AREA OF THE STATOR AND ROTOR SLOTS OF ASYNCHRONOUS COMMON INDUSTRIAL MOTORS

The influence of the value of overload capability on parametric multiplier is analyzed, the value of parametric multiplier is taken into account at determining of main dimensions for machine. The value of parametric multiplier is slightly changed at variations of the overload capability within the range used for the majority of industrial motor. It was proposed to lower the rated slip for getting higher values. The expression was composed connecting rated and critical slip and overload capability for induction motor. The research for the influence of the relative length of stator core with phase-wound rotor on optimal transverse geometry was done. The changing of relating length has a small impact on optimal value of stator core diameter and value of flux density in air gap. The more value of more the value of electromagnetic torque regardless of numbers of pair of poles of motor. Calculation data is in good agreement with data based on analyzing of technical information for industrial induction motors with short-circuited and phase-wound rotors.

Relative diameter of the bore of the stator, the magnetic induction in the air gap, parametric factor, functional factor, rectangular and oval slots, number of poles, number of slots
