

## ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ РОТОРА СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Е. В. КОНОНЕНКО, Г. И. ЛУКИЯНОВ

Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники

В связи с расширением области применения синхронных реактивных двигателей (СРД) особенно актуальными становятся исследования оптимальных соотношений при их проектировании и разработка практических рекомендаций.

В большинстве случаев СРД проектируются на базе асинхронных двигателей. В этом случае геометрия статора является заданной. Требуемые характеристики могут быть получены изменением обмоточных данных статора и конструкции ротора.

Геометрия ротора СРД характеризуется величинами воздушного зазора между статором и ротором, коэффициентом полюсного перекрытия, количеством, размерами и расположением дополнительных немагнитных пазов, количеством и размерами пазов пусковой обмотки. При проектировании СРД необходимо иметь рекомендации по выбору указанных элементов конструкции ротора.

От конструкции ротора зависят синхронные реактивные сопротивления  $x_d$  и  $x_q$ . Последние пропорциональны коэффициентам формы поля  $k_d$ ,  $k_q$  и обратно пропорциональны величине воздушного зазора и коэффициентам насыщения магнитной цепи.

Влияние геометрии ротора на коэффициенты  $k_d$  и  $k_q$  исследовано в [1]. На основании этого рекомендуется выбирать высоту полюса не менее  $0,1\tau$ , ширину дополнительного магнитного паза на полюсе ( $\Delta$ ) не менее  $(0,05—0,07)\tau$ . При выборе величины расстояния между немагнитными пазами следует ограничиваться диапазоном значений  $(0,05—0,15)\tau$ . Высоту дополнительного немагнитного паза рекомендуется выбирать минимально возможной, не более  $0,5\tau$ . Наиболее благоприятные значения коэффициента полюсного перекрытия для усовершенствованных СРД лежат в пределах  $0,55—0,65$ . Воздушный зазор выбирается равным  $(0,003—0,005)\tau$ .

Ротор усовершенствованных СРД может быть выполнен с различным числом дополнительных немагнитных пазов. Количество этих пазов, их ширина оказывают существенное влияние на энергетические показатели. В табл. 1 приведены максимальные значения полезной мощности, к. п. д. и коэффициента мощности в зависимости от числа немагнитных пазов на полюсе. Опытные образцы выполнены с коэффициентом полюсного перекрытия  $\alpha_p = 0,8$ . Листы роторов имеют конструкции, показанные на рис. 1. Как видно из рисунка, конструкции ротора имеют различную суммарную ширину немагнитных пазов на полюс. Из данных таблицы следует, что наилучшими энергетическими показате-

Таблица 1

Число пазов	1	2	3
$P_{2m}, кВт$	1,52	2,3	3,25
$(\cos \varphi)_m$	0,532	0,593	0,695
$\eta_m$	77,5	82,3	86,3

лями и максимальной мощностью обладает конструкция ротора с тремя немагнитными пазами на полюс (рис. 1, в). Если убрать центральный немагнитный паз и оставить на роторе только два немагнитных паза (рис. 1, б), то это приведет к уменьшению  $P_{2m}$  на 29%, коэффициента мощности на 14,7% и к. п. д. на 4,6%. Если на роторе оставлять только центральный немагнитный паз (рис. 1, а), то характеристики двигателя ухудшаются еще больше, так как при этом суммарная ширина немагнитных пазов уменьшается. Однако, учитывая то, что в ярме ротора не всегда оказывается достаточно места для размещения дополнительных пазов в большом количестве, следует отдавать предпочтение конструкции ротора с двумя дополнительными пазами. И лишь при малых диаметрах ротора можно выбирать конструкцию с одним пазом на полюсе.

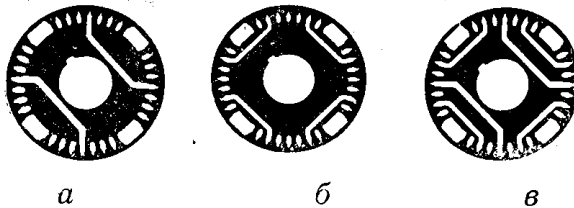


Рис. 1. Листы ротора СРД с различным числом и расположением немагнитных пазов

После того, как выбраны конструктивное исполнение ротора, коэффициент полюсного перекрытия и величина воздушного зазора, дальнейшим этапом проектирования ротора СРД является определение оптимальной геометрии зубцовой зоны, т. е. выбор размеров и соотношений размеров зубцов и пазов пусковой обмотки.

В СРД ввиду наличия на роторе дополнительных немагнитных пазов и повышенной по сравнению с асинхронными двигателями индукции в воздушном зазоре магнитная цепь оказывается более насыщенной, чем в асинхронных двигателях. Анализ спроектированных машин показывает, что намагничивающая сила (н. с.) ротора составляет от 10 до 25% от н. с. всей магнитной цепи. При неправильном выборе геометрии зубцовой зоны н. с. ротора может увеличиваться в 2—5 и более раза по сравнению с указанной величиной. Поэтому при выборе геометрии зубцовой зоны ротора следует стремиться к обеспечению минимального значения н. с.

Если площадь паза пусковой обмотки определена и остается постоянной, то при варьировании высотой или шириной зубца ротора индукции в ярме и зубцах ротора, как это видно из рис. 2, изменяются в противоположных направлениях. Поэтому при определенных соотношениях размеров зубцов и пазов суммарная н. с. ротора будет иметь минимум (рис. 3). Следовательно, если выбрать такие соотношения геометрии зубцовой зоны, при которых н. с. ротора будет минимальной, то результирующая н. с. также будет минимальной. Это должно привести к увеличению коэффициента мощности. Поэтому при выборе ширины и высоты зубца ротора следует исходить из минимума н. с. ротора. При этом предположим, что высота полюса равна высоте паза пусковой обмотки и высоте междуполюсного пространства. При определении шага пазов пусковой обмотки считаем, что пазы распределены равномерно по всей окружности ротора.

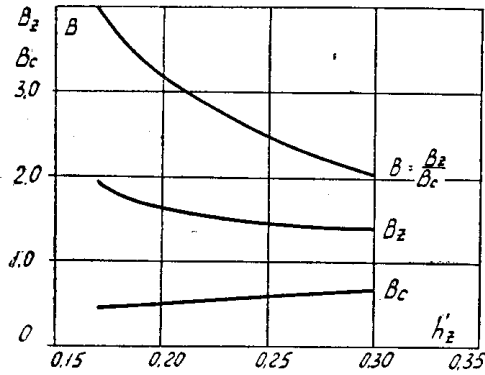


Рис. 2. Зависимости индукций в зубцах и спинке ротора и их отношения от высоты зубца

Намагничивающая сила ротора равна сумме н. с. зубцов и спинки

$$F_2 = 2h_z \cdot H_z + l_c \cdot H_c, \quad (1)$$

где  $H_z$  и  $H_c$  — напряженности магнитного поля в зубцах и спинке ротора соответственно,

$h_z$  — высота полюса или зубца ротора.

Средняя длина магнитных силовых линий в спинке ротора  $l_c$  определяется по известным формулам, а средняя высота спинки ротора равна

$$h_{cp} = \frac{1}{2} (D_2 - d_B) - h_z - \delta_B, \quad (2)$$

где  $d_B$  — диаметр вала,

$\delta_B$  — ширина дополнительных немагнитных пазов в спинке ротора.

Тогда с учетом (2) н. с. ротора, отнесенная к полюсному делению, определяется из следующего выражения:

$$F'_2 = 2h'_z \cdot H_z + H_c \cdot \frac{\pi}{4p} \left( \frac{2p}{\pi} + d'_B + 2h'_z + 2\delta'_B \right), \quad (3)$$

где  $h'_z = \frac{h_z}{\tau}$ ,  $d'_B = \frac{d_B}{\tau}$ ,  $\delta'_B = \frac{\delta_B}{\tau}$  и принято, что  $D_2 \approx D$ ,  $D$  и  $D_2$  —

диаметры расточки статора и ротора соответственно.

Минимальное значение н. с. и соответствующее ей значение  $h'_z$  можно определить, исходя из условия равенства нулю первой производной выражения (3). Для дифференцирования этого выражения необходимо кривую намагничивания стали представить в аналитической форме. Однако в данном случае более простым и удобным является определение минимума н. с. непосредственным расчетом по формуле (3). Такой метод позволяет также установить допустимые пределы отклонения от оптимальных значений  $h'_z$ .

Индукции в ярме и зубцах, по которым определяются соответствующие напряженности магнитного поля, находятся по выражениям

$$= \frac{B_{md} \cdot \alpha_d}{k_c \cdot \left( \frac{2p}{\pi} - d'_B - 2\delta'_B - 2h'_z \right)}; \quad B_z = \frac{B_{md} \cdot t_2}{k_c \cdot b_z}, \quad (4)$$

$\alpha_d$  — расчетный коэффициент полюсной дуги по продольной оси. Ширину зубца ротора выразим через переменную  $h'_z$ . В СРД малой мощности чаще всего на роторе применяются овальные пазы. Для площади овального паза справедливо выражение

$$Q_n = \frac{b_z^2 \cdot Z^2}{(Z - \pi^2)} \cdot K - \frac{b_z \cdot Z}{(Z - \pi)^2} \cdot (2MK + h_1 \cdot N) + \frac{M^2K + h_1MN - h_1^2 \pi N}{(Z - \pi)^2}, \quad (5)$$

где

$$K = \frac{\pi(Z^2 + \pi^2)}{4(Z + \pi)^2} - \frac{Z^2}{(Z + \pi)^2}; \quad M = \pi(D_2 - 2h_{ш}), \quad h_1 = h_z - h_{ш};$$

$$N = \frac{2Z - \pi^2}{2}, \quad Z - \text{число пазов ротора в предположении, что пазы распо-}$$

ложены по всей окружности равномерно,

$h_{ш}$  — высота шлица паза ротора.

Из выражения (5) находим ширину зубца

$$b_z = \frac{(2MK + h_1N) \pm \sqrt{(h_1N)^2 + 4K[h_1^2 \pi N + Q_n(Z - \pi)^2]}}{2KZ}. \quad (6)$$

Подставим (6) в (4), тогда получим

$$B_z = \frac{B_{md}}{k_c \left\{ 1,975K + \frac{h'_z N}{2p} \pm \sqrt{\left(\frac{h'_z \cdot N}{2p}\right)^2 + 4K \left[ \left(\frac{h'_z}{2p}\right)^2 \pi N + \frac{Q'_n(Z - \pi)^2}{\pi Z} \right]} \right\}}, \quad (7)$$

где  $Q'_n = \frac{Q_n \cdot Z}{\pi D^2}$ ,  $Q_n$  — площадь одного паза ротора.

При выводе формулы (7) принято  $\frac{4h_{ш}}{D_2} = 0,025$ , что имеет место

в реальных двигателях, кроме того, ввиду малого значения  $h_{ш}$  по сравнению с высотой паза принято  $h'_1 \approx h'_z$ .

Изменяя  $h'_z$  в практически приемлемых пределах и при условии, что  $\delta'_в, d'_в, Q'_n, B_{md}$  постоянны, по формулам (3), (4) и (7) можно рассчитать зависимость  $F'_2 = f(h'_z)$ . На рис. 3 приведены такие зависимости для СРД, спроектированного на базе асинхронного серии А02 и име-

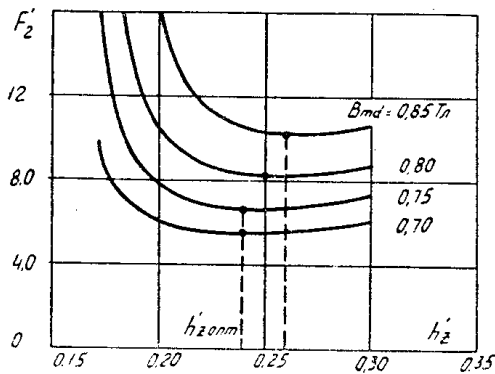


Рис. 3. Зависимости н. с. ротора от высоты зубца при различных значениях  $B_{md}$

ющего следующие исходные данные:  $2p=6, Z=48, d'_в=0,55, \delta'_в=0,14, B_{md}=0,75 \text{ Тл}, Q'_n=0,04$ . Из кривых этого рисунка видно, что н. с. ротора, например при  $B_{md}=0,75 \text{ Тл}$ , имеет минимум при  $h'_z_{\text{опт}}=0,24$ . При выборе  $h'_z$  на 29% меньше оптимального значения н. с. ротора возрастает в 2,57 раза по сравнению с минимально возможным значением. С точки зрения уменьшения коэффициента  $k_q$  высоту полюса (зубца) достаточно выбирать не менее 0,1т. Расчеты показывают, что при таких

значениях  $h'_z$  для данного двигателя н. с. ротора возрастает в десятки раз. Следовательно, при выборе высоты полюса необходимо также руководствоваться соображениями уменьшения н. с.

На н. с. ротора оказывает влияние ширина дополнительного немагнитного паза  $\delta'_в$ . Расчеты показали, что с увеличением  $\delta'_в$  н. с. ротора увеличивается, что связано с возрастанием индукции в спинке, и достигает минимума при меньших значениях  $h'_z$ .

Значительное влияние на н. с. ротора оказывает величина максимальной индукции в воздушном зазоре. С увеличением  $B_{md}$  н. с. ротора возрастает (рис. 3) и ее минимум сдвигается в сторону больших значений  $h'_z$ .

Влияние относительной площади пазов на н. с. и  $h'_{z\text{ опт}}$  показано на рис. 4. Из кривых видно, что при малых значениях  $Q'_n$  н. с. ротора мало изменяется в достаточно широком диапазоне изменения  $h'_z$ . С увеличением  $Q'_n$  н. с. возрастает, так как при одной и той же высоте паза ширина зубца с увеличением  $Q'_n$  уменьшается, что приводит к возрастанию индукции в зубцах. С увеличением  $Q'_n$  следует выбирать большие значения  $h'_z$ , чтобы н. с. была минимальной.

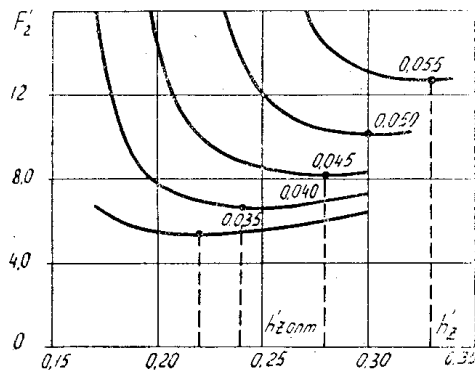


Рис. 4. Зависимости н. с. ротора от высоты зубца при различных значениях  $Q'_n$  ( $B_{md}=0,75$ )

На основании расчетов определены оптимальные значения высоты паза в зависимости от площади паза для двигателей мощностью 0,6—10 кВт, спроектированных на базе серии А02, которые приведены на рис. 5. Этими данными удобно пользоваться при предварительном выборе высоты паза.

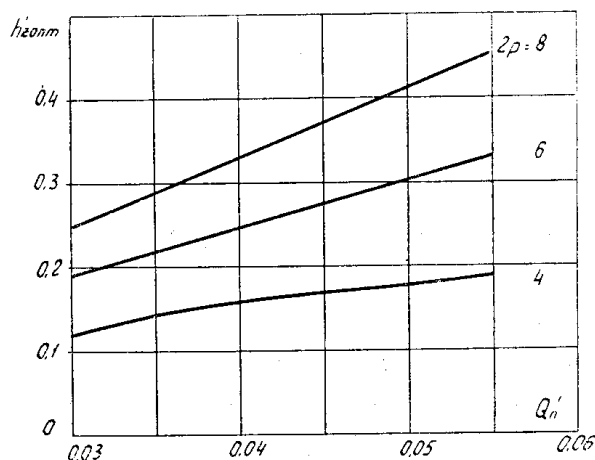


Рис. 5. Оптимальные значения высоты паза ротора в зависимости от относительной площади паза ( $B_{md}=0,75$ )

Аналогичные расчеты были выполнены для серии СРД, спроектированных на базе новой серии 4А асинхронных двигателей высотой оси вращения 80—132 мм. Предварительные расчеты этих двигателей показали, что максимальная индукция в воздушном зазоре находится в пределах 0,95 — 1,00 Тл. При  $B_{md}=0,95$  Тл. и  $Q'_n=0,05$  определены оптимальные значения высоты паза, ширины зубца, индукции в зубцах и спинке ротора, которые имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} h'_z \text{ опт} &= 0,18-0,20; & b_z \text{ опт} &= (0,47-0,53)t_2 \\ B_z \text{ опт} &= 2,1-2,0 \text{ Тл.}; & B_c \text{ опт} &= 1,6-1,8 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Диаметры овального паза ротора определяются из выражений

$$d_2 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{ш}) - Z \cdot b_z}{Z + \pi}, \quad d_1 = \frac{d_2(Z + \pi) - 2\pi(h_z - h_{ш})}{Z - \pi}. \quad (8)$$

Расстояние между центрами окружностей паза

$$h_{12} = \frac{(h_z - h_{ш}) \cdot Z - d_2 \cdot Z}{Z - \pi}. \quad (9)$$

Целесообразность выбора пазовой геометрии ротора, исходя из минимума н. с., подтверждается результатами расчета рабочих характеристик. В табл. 2 приведены номинальные данные и максимальные значения к. п. д., коэффициента мощности, полезной мощности для двигателя СРО-31-4 номинальной мощностью 2,2 кВт, рассчитанные при высоте паза  $h'_z=0,206$ , что близко к оптимальной, и с уменьшенной на 22%, но при сохранении площади паза ротора неизменной. Если геометрические соотношения зубцовой зоны ротора выбраны, исходя из минимума н. с., то, как видно из приведенных данных, увеличивается не только коэффициент мощности, но возрастает также и к. п. д.

Таблица 2

$h'_z$	$I_n, \text{ А}$	$\eta_n, \%$	$\cos \varphi_n$	$\eta_m, \%$	$(\cos \varphi)_m$	$P_{2m}, \text{ кВт}$
0,206	5,98	80,7	0,687	80,9	0,722	3,42
0,160	6,62	78,5	0,638	78,6	0,688	3,38

В двухполюсных машинах ввиду сравнительно малого диаметра ротора возможности варьирования размеров пазов и поиска их оптимальных значений ограничены. Поэтому приходится их выбирать, исходя из максимально допустимых индукций в зубцах и ярме, которые составляют примерно 2,1 Тл.

Проектирование геометрии зубцовой зоны ротора включает и выбор величины площади паза. С точки зрения уменьшения н. с. и повышения энергетических показателей необходимо выбирать ее минимально возможной. Однако от величины  $Q'_n$  зависят также и пусковые характеристики. Так, например, для увеличения момента входа в синхронизм целесообразно уменьшить активное сопротивление пусковой обмотки [2].

Анализируя пусковые характеристики построенных и испытанных машин, можно рекомендовать значения  $Q_n$ , равные 0,045—0,055, или принять равной (0,8—1,0)  $Q'_n$  соответствующего асинхронного двигателя. При таких значениях  $Q'_n$  СРД обладает удовлетворительными пусковыми характеристиками.

Число пазов ротора подбирается в зависимости от числа пазов статора по рекомендациям [3], кроме того, оно должно быть кратным 2р. Однако удовлетворение последнему условию не всегда возможно. В этом

случае вначале следует определять ориентировочное значение ширины полюса из условия

$$b_p = (0,55 - 0,65) \tau,$$

а затем можно определить и число стержней на полюсе, которое должно быть целым числом

$$a_c = \frac{b_p}{t_2} - 1.$$

Шаг стержней пусковой обмотки выбирается из таких же условий, что и для обычных синхронных двигателей [3]

$$t_2 \neq t_1, \quad t_2 \geq 0,8 t_1.$$

Затем определяются размеры пазов ротора. Таким образом, описанная методика определения геометрии зубцовой зоны ротора может быть использована при проектировании СРД.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко. Синхронные реактивные машины. М., «Энергия», 1970.
2. Е. В. Кононенко, Г. И. Лукьянов. К проектированию оптимальных синхронных реактивных двигателей. Известия ТПИ, т. 242, Томск, 1972.
3. П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горянов. Проектирование электрических машин. М., «Энергия», 1969.