

## Содержание

### 1. Введение

. Определение главных размеров

. Обмотка статора

. Обмотка и пазы ротора, короткозамыкающее кольцо

. Параметры двигателя для рабочего режима

.1 Активное сопротивление

.2 Индуктивное сопротивление

.2.1 Коэффициент магнитной проводимости рассеяния статора

.2.2 Коэффициент магнитной проводимости рассеяния ротора

.3 Намагничивающий ток

.3.1 Воздушный зазор

.3.2 Зубцы статора

.3.3 Зубцы ротора

.3.4 Спинка статора

.3.5 Спинка ротора

.3.6 Параметры магнитной цепи

. Потери холостого хода

. Круговая диаграмма

.1 Рабочие характеристики

. Начальный пусковой момент и начальный пусковой ток

. Максимальный момент

. Тепловой расчет

Заключение

Список литературы

## 1. Введение

Асинхронный двигатель является преобразователем электрической энергии в механическую и составляет основу большинства механизмов, использующихся во всех отраслях народного хозяйства.

В настоящее время асинхронные двигатели потребляют более 40% вырабатываемой электрической энергии, на их изготовление расходуется большое количество дефицитных материалов (обмоточной медной проволоки, изоляции, электрической стали) и других затрат.

Средства на ремонт и обслуживание асинхронных двигателей в эксплуатации составляют более 5% затрат на обслуживание всего установленного оборудования.

Поэтому создание серии высокоэкономичных и надежных асинхронных двигателей является важнейшей народно-хозяйственной задачей, а правильный выбор двигателей, их эксплуатация и высококачественный ремонт играют первоочередную роль в экономике материалов и трудовых ресурсов.

В серии 4А за счет применения новых электротехнических материалов и рациональной конструкции, мощность двигателей при данных высотах оси вращения повышена на 2-3 ступени по сравнению с мощностью двигателей серии А2, что дает большую экономию дефицитных материалов.

Серия имеет широкий ряд модификаций, специализированных исполнений, рассчитанных на максимальное удовлетворение нужд электропривода.

## 2. Определение главных размеров

Под главными размерами двигателя подразумевается внутренний  $D_1$  и наружный  $D_{H1}$  диаметры статора и его длина  $l_1$ . От этих размеров и их соотношения в значительной мере зависят все основные характеристики машины, ее вес, стоимость, надежность, поэтому они называются главными. Для двигателя заданной мощности можно выбрать различные  $D_{H1}$  и  $l_1$ .

Обычно при проектировании делают расчеты нескольких вариантов и затем определяют оптимальный. Эти расчеты делают с помощью РС. По результатам таких расчетов получены зависимости наружного диаметра статора  $D_{H1}$  от высоты оси вращения  $h$  относительно опорной плоскости лап.

Исходные данные для расчета

Полезная мощность на валу

$$P_2 = 37 \text{ кВт}$$

Число полюсов

$$2p = 4$$

Номинальное напряжение

$$U_1 = 220/380 \text{ В}$$

Высота оси вращения

$$h = 200 \text{ мм}$$

Степень защиты IP44 (закрытое исполнение).

Способ охлаждения ICO 141 (самоохлаждение с помощью вентилятора на валу двигателя путем обдува внешней поверхности корпуса).

Класс нагревостойкости изоляции- F

Коэффициент полезного действия ( $\eta_n$ )

$$\eta_n = 91 \%$$

Коэффициент мощности

$$\cos \phi_n = 0,9$$

Исходя из этих данных, определим главные размеры проектируемого электродвигателя.

$$\text{Наружный диаметр сердечника } D_{H1} = 349 \text{ мм}$$

Затем определяем подводимую мощность

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta_H \cdot \cos \phi_H} = \frac{37000}{0,91 \cdot 0,9} = 45,2 \cdot 10^3 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

и допустимую подводимую мощность, приходящуюся на 1 мм длины сердечника  $\frac{P_1}{l_1}$ .  
 Значение  $\frac{P_1}{l_1} = 262 \frac{\text{В} \cdot \text{А}}{\text{мм}}$  определяется по (1, рис.3). Уточнение по (1, табл.2) не требуется.

По вычисленному значению  $\frac{P_1}{l_1}$  определяем длину сердечника статора  $l_1' = \frac{45,2 \cdot 10^3}{262} = 172,5 \text{ мм}$ . Округляем это значение до  $l_1' = 170 \text{ мм}$ . и определяем

отношение длины сердечника к наружному диаметру статора  $\lambda_2 = \frac{l_1'}{D_{H1}}$ , которое должно по возможности приближаться к предельному значению, определенному по (1, рис.4).

$$\lambda_2 = \frac{l_1'}{D_{H1}} = \frac{170}{349} = 0,487$$

Предельное значение  $\lambda_2$  (1, рис.4)

$$\lambda_{2 \max} = 0,7$$

Внутренний диаметр сердечника статора  $D_1$  определяем по (1, рис.5).

$$D_1 = 0,67 \cdot D_{H1} = 233 \text{ мм}$$

Воздушный зазор  $\delta$  влияет на энергетические показатели машины, в первую очередь на величину намагничивающего тока и коэффициент мощности, на К.П.Д. двигателя, использование активных материалов, индуктивные сопротивления рассеивания и т.д. Поэтому воздушный зазор надо выбирать по возможности меньшим. При выборе воздушного зазора рекомендуется пользоваться установленными практикой электромашиностроения средними значениями  $\delta$  из.

Наружный диаметр сердечника ротора

$$D_{H2} = D_1 - 2\delta = 233 - 2 \cdot 0,7 = 231,6 \text{ мм}$$

Внутренний диаметр листов ротора

$$D_2 = K_6 \cdot D_{H1} = 0,23 \cdot 349 = 80 \text{ мм}$$

где значение  $K_6 = \frac{D_2}{D_{H1}} = 0,23$  берем из (1, табл.3).

Внутренний диаметр сердечника ротора D2 соответствует наименьшему возможному диаметру вала. Аксиальные каналы ротора отсутствуют.

Длина сердечника ротора l2 принимается равной длине сердечника статора l1 для двигателей с высотой оси вращения  $h \leq 250$  мм.

Сердечники статора и ротора изготавливают из холоднокатаной изотропной электротехнической стали в соответствии с (1, табл.5). Марка стали 2013. Толщина листов стали: 0,5 мм.

Коэффициент заполнения сталью сердечника статора  
 $K_{C1} = 0,97$

Коэффициент заполнения сталью сердечника ротора  
 $K_{C2} = 0,97$

Числа пазов статора Z1 и ротора Z2 определим из (1, табл.6)  
 $Z_1 = 48$  ,  $Z_2 = 38$

### 3. Обмотка статора

Обмотка статора является одной из наиболее важных и ответственных частей электрической машины. Статорные обмотки асинхронных двигателей состоят из катушек, которые размещены в пазах сердечника. Катушки могут состоять из одного или нескольких витков. Если в пазу располагается только одна сторона катушки (секции), то такая обмотка называется однослойная. Кроме однослойных широкое распространение получили также и двухслойные обмотки, когда в пазу располагается две стороны разных катушек.

Обмотки машин переменного тока характеризуется следующими данными:

числом пазов  $Z_1$

числом пар полюсов  $2p$

числом фаз  $m$

числом параллельных ветвей  $a_1$

числом последовательно соединенных витков фазы  $w$

числом секций  $y_1$

числом пазов на полюс и фазу  $q_1$

схемой соединения обмоток (звезда или треугольник).

Если шаг равен полюсному делению  $\tau$ , то такая обмотка имеет диаметральные шаг.

При  $y < \tau$  обмотка имеет укороченный шаг. Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm}.$$

Для асинхронных двигателей обычно  $q_1$  выбирают равным целому числу, кроме двигателей с числом пар полюсов  $2p=8, 2p=10$ ; для которых  $q_1$  может быть равно дробному числу (например  $2\frac{1}{2}; 2\frac{1}{4}; 1\frac{1}{2}$  и т.д.)

Рекомендуемые значения  $q_1$  приведены в (1, табл. 7).

У двигателей с  $h=56...160$  мм применяют полузакрытые пазы с однослойной концентрической двухплоскостной обмоткой из мягких секций. такая обмотка облегчает применение автоматических станков для намотки статоров. В двигателях с  $h=180...250$  мм применяют двухслойную обмотку из мягких секций. При ручной укладке катушки имеют одинаковые размеры и допускается изготовление на одном шаблоне. Иногда при механизированной укладке обмоток используют специальные схемы равносекционных одно-двухслойных и двухслойных концентрических обмоток.

Число пазов на полюс и фазу = 4

Двухслойные обмотки дают возможность выбора благоприятного шага (т.е. ширины секции), что позволяет улучшить форму кривой поля и Э.Д.С., уменьшить потери и расход меди за счет укорочения шага обмотки. В асинхронных машинах обычно применяют двухслойные петлевые обмотки с укороченным шагом.

Двухслойные обмотки также характеризуются шагами обмотки:

$y_1$  - первый частичный шаг - это расстояние между сторонами одной и той же секции, выраженное в числе пазов;

$y$  - это результирующий шаг обмотки, т.е. расстояние, или число пазов, лежащих между одинаковыми активными сторонами двух соседних катушек.

Шаг обмотки  $y_1$  может быть диаметральным ( $y_1=\tau$ ) или укороченным ( $y_1<\tau$ ). Укорочение шага делается с целью экономии обмоточного провода (за счет меньшей длины лобовых частей) и улучшения формы кривой магнитного поля и уменьшения таким образом высших гармонических составляющих магнитного потока, благодаря чему уменьшаются добавочные потери и провалы в кривой момента.

Двухслойные обмотки имеют укороченный шаг

$$y_{n1} = \beta \cdot \frac{z_1}{2p} = 0,833 \cdot \frac{48}{4} = 10$$

Укорочение шага  $\beta$  при  $2p \geq 4$  равно 0,833.

Обмоточный коэффициент равен  $k_{O1} = k_{p1} \cdot k_{y1}$ ,

где:  $k_{p1}$  - коэффициент распределения, равный

$$k_{p1} = \frac{\sin 30^\circ}{q_1 \cdot \sin \frac{30}{q_1}} = 0,958$$

$k_{y1}$  - коэффициент укорочения шага, равный

$$k_{y1} = \sin \beta \cdot 90 = 0,966$$

$$k_{o1} = k_{p1} \cdot k_{y1} = 0,958 \cdot 0,966 = 0,925$$

Значения  $\beta$ ,  $k_{y1}$ ,  $k_{p1}$ ,  $k_{o1}$  в зависимости от  $q_1$  также приведены в (1, табл.9).

Предварительное значение индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  в зависимости от ДН1, числа полюсов и степени защиты можно определить по (1, рис.10).

$$B_\delta = 0,77 \text{ Тл}$$

Тогда предварительное значение магнитного потока в воздушном зазоре

$$\Phi_{\text{ПРЕДВ}} = \frac{B_\delta \cdot D_1 \cdot l'_{1n} \cdot 10^{-6}}{P} = \frac{0,77 \cdot 233 \cdot 170 \cdot 10^{-6}}{2} = 0,0152 \text{ Вб}$$

Предварительное число витков в обмотке фазы

$$W_{1 \text{ ПРЕРДВ}} = \frac{k_E \cdot U_1}{222 \cdot k_{O1} \cdot \Phi_{\text{ПРЕРДВ}}} = \frac{0,978 \cdot 220}{222 \cdot 0,925 \cdot 0,0152} = 66,55$$

где:  $k_E$  - коэффициент, показывающий на сколько Э.Д.С. Е1 меньше напряжения сети  $U_1$ . Значение  $k_E$  выбираем по (1, рис.11). Коэффициент падения напряжения в обмотке статора:  $k_E = 0,978$

Предварительное число эффективных проводников в пазу

$$N_{n1 \text{ прердв}} = \frac{W_{1 \text{ прердв}} \cdot a_1}{p \cdot q_1} = \frac{66,55 \cdot 2}{2 \cdot 4} = 16,63$$

где  $a_1$  - число параллельных ветвей обмотки фазы статора, принято  $a_1 = 2$ .

У машин малой мощности  $a = 1$ , т.к. значения фазного тока малы и сечение обмоточного провода менее  $2 \text{ мм}^2$ . При больших значениях фазного тока сечение обмоточного провода увеличивается, что снижает производственную технологичность обмотки, поэтому необходимо применять несколько параллельных ветвей обмотки статора.

Параллельные ветви обмотки должны содержать одинаковое число витков, а стороны катушек - находиться в магнитном поле в одинаковых условиях, т.е. векторы Э.Д.С. параллельных ветвей должны быть равны и одинаково направлены. Возможное число параллельных ветвей должно быть одним из делителей числа полюсов.

Полученное предварительное число эффективных проводников округляется до ближайшего целого числа. При этом у двухслойных обмоток должно быть принято преимущественно четное  $N_{n1}$ .

Принимаем  $N_{n1} = 17$ .

Уточненное число витков обмотки фазы статора:

$$W_1 = \frac{N_{n1} \cdot p \cdot q_1}{a_1} = \frac{17 \cdot 2 \cdot 4}{2} = 68$$

Эффективное число витков обмотки фазы статора:

$$W_{1 \text{ эф}} = W_1 \cdot k_{O1} = 68 \cdot 0,925 = 62,9$$

Уточненная расчетная длина сердечника статора:

$$l'_1 = l'_{1n} \frac{W_{1 \text{ ПРЕРДВ}}}{W_1} = 170 \cdot \frac{66,55}{68} = 166,3 \text{ мм}$$

При длине  $l'_1 < 100$  мм полученное значение  $l'_1$  округляют до ближайшего целого числа, а при  $l'_1 > 100$  мм - до ближайших 5 или 10 мм.

Принимаем  $l'_1 = 170$  мм (стандартное значение).

$$\Phi_\delta = \Phi_{\text{ПРЕРДВ}} \cdot \frac{W_{1 \text{ ПРЕРДВ}}}{W_1} = 0,0152 \cdot \frac{66,55}{68} = 0,01487 \text{ Вб}$$

Уточненное значение магнитной индукции в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta \cdot p}{D_1 \cdot l'_1 \cdot 10^{-6}} = \frac{0,01487 \cdot 2}{233 \cdot 170 \cdot 10^{-6}} = 0,7508 \text{ Тл.}$$

Номинальный фазный ток:

$$I_{1H} = \frac{P_1}{3U_1} = \frac{45,2 \cdot 10^3}{3 \cdot 220} = 68,48 \text{ А}$$

Линейная нагрузка статора:

$$A_1 = \frac{10 \cdot N_{n1} \cdot z_1 \cdot I_1}{\pi \cdot D_1 \cdot a} = \frac{10 \cdot 17 \cdot 48 \cdot 68,48}{\pi \cdot 233 \cdot 2} = 381,8 \frac{A}{см}$$

Вычисленное значение  $A_1$  необходимо сравнить со средним уровнем линейных нагрузок современных электродвигателей по (1, рис.12). Если полученные значения  $A_1$  отличаются значительно, необходимо пересчитать  $N_{1предв.}$ , изменив число параллельных ветвей  $a_1$ .

Уровень линейных нагрузок в современных двигателях (1, рис.12):

$$A_1 = 445 \left[ \frac{A}{см} \right]$$

Расчетная высота спинки статора:

$$h_{c1} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2l_{\text{эф}1} \cdot B_{c1}} = \frac{0,01487 \cdot 10^6}{2 \cdot 164,9 \cdot 1,525} = 29,5 \text{ мм}$$

где:  $l_{\text{эф}1}$  - эффективная длина сердечника статора,

$$l_{\text{эф}} = l'_{1n} \cdot k_{C1} = 170 \cdot 0,97 = 164,9 \text{ мм};$$

$B_{c1}$  - магнитная индукция в спинке статора, определяемая по (1, табл.10) в зависимости от  $h$ ,  $U_1$  и  $2p$ .

Предварительное значение магнитная индукции в спинке статора:

$$B_{c1} = 1,525 \text{ Тл}$$

Высота паза статора:

$$h_{n1} = \frac{(D_{n1} - D_1)}{2} - h_{c1} = \frac{(349 - 233)}{2} - 29,5 = 28,5 \text{ мм}$$

Зубцовое деление по внутреннему диаметру статора:

$$t_1 = \frac{\pi D_1}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 233}{48} = 15,24 \text{ мм.}$$

У машин с высотой  $h$  до 250 мм применяют полузакрытые пазы статора трапецеидальной формы (1, рис.13).

Расчетная ширина зубца с равновеликим сечением

$$b_{z1} = \frac{t_1 \cdot B_\delta}{k_{c1} \cdot B_{z1}} = \frac{15,24 \cdot 0,7508}{0,97 \cdot 1,775} = 6,64 \text{ мм.}$$

Магнитная индукция в зубцах  $B_{z1} = 1,775 \text{ Тл}$  принята по (1, табл.11).

Размеры трапецеидального паза при угле  $\beta = 45^\circ$  (для двигателей с  $h = 50 \dots 250 \text{ мм}$ ):

большая ширина паза

$$b_1 = \frac{\pi (D_1 + 2h_{n1})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{3,14 \cdot (233 + 2 \cdot 28,5)}{48} - 6,64 = 12,3 \text{ мм.}$$

меньшая ширина паза

$$b_2 = \frac{\pi (D_1 + 2h_{u1} - b_{u1}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{3,14 \cdot (233 + 2 \cdot 1 - 3,7) - 48 \cdot 6,64}{48 - 3,14} = 9,09 \text{ мм.}$$

где:  $b_{u1} = 3,7 \text{ мм}$  - ширина шлица, принимаемая по (1, табл.12),  $h_{u1} = 1,0 \text{ мм}$   
- высота шлица паза принятая.

Площадь поперечного сечения паза в штампе

$$Q_{n1} = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \left( h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} \right) = \frac{12,3 + 9,09}{2} \cdot \left( 28,5 - 1 - \frac{9,09 - 3,7}{2} \right) = 278,2 \text{ мм}^2$$

$$\text{где } \frac{b_2 - b_{u1}}{2} = h_k = 2,7 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения паза в свету

$$Q'_{n1} = \left( \frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \cdot \left( h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} - h_c \right) = \left( \frac{12,3 + 9,09}{2} - 0,2 \right) \cdot \left( 28,5 - 1 - \frac{9,09 - 3,7}{2} - 0,2 \right) = 262,5 \text{ мм}^2$$

где  $b_c$  и  $h_c$  - припуски на сборку сердечников по ширине и высоте паза, принимаемые по (1, табл.13).

Площадь поперечного сечения паза, занимаемая обмоткой

$$Q_u = b_u (2 h_{n1} + b_1 + b_2)$$

где:  $Q_u$  - площадь поперечного сечения корпусной изоляции;

$$Q_u = b_u (2 h_{n1} + b_1 + b_2) = 0,4 \cdot (2 \cdot 28,5 + 12,3 + 9,09) = 31,36 \text{ мм}^2$$

где:  $b_u = 0,4$  мм - однослойная толщина корпусной изоляции из (1, табл.14);  $p_r$  - площадь поперечного сечения прокладок между верхней и нижней катушками в пазу (при двухслойной обмотке), на дне паза и под клином

Площадь сечения прокладок для двигателей с  $h = 180 \dots 250$  мм можно определить по формуле

$$Q_{np} = 0,4 b_1 + 0,9 b_2 = 0,4 \cdot 12,3 + 0,9 \cdot 9,09 = 13,11 \text{ мм}^2$$

Тогда

$$Q_n = Q_{\text{Sub}} \cdot Q_{\text{Sup}} - Q_{\text{Sub}} \cdot Q_{\text{Sub}} = 262,5 \cdot 31,36 - 13,11 \cdot 218,03 = 218,03 \text{ мм}^2$$

Проводники обмотки статора располагаются в пазу беспорядочно, поэтому коэффициент заполнения паза изолированными проводниками равен  $k_n = 0,7 \dots 0,75$ :

$$k_n = \frac{N_{n1} \cdot (d')^2}{Q_n} \cdot i \cdot i$$

где:  $d'$  - диаметр провода с изоляцией, мм.

Для обмоток статоров с полузакрытыми пазами рекомендуются провода круглого сечения марки ПЭТВ или ПЭТВМ при классе нагревостойкости В и ПЭТ - 155 или ПЭТМ при классе нагревостойкости F.

Допустимый диаметр изолированного провода

$$d' = \sqrt{\frac{Q_n}{N_{n1} \cdot i \cdot i}} = \sqrt{\frac{218,03}{17 \cdot 17}} = 1,17 \text{ мм}$$

Для облегчения укладки обмотки диаметр провода у двигателей с механизированной укладкой обмотки ( $h \leq 160$  мм) не должен превышать 1,33 мм, а при ручной укладке ( $h \geq 180$  мм) - 1,71 мм. При больших значениях  $d'$  эффективные проводники подразделяются на элементарные, число которых обычно не превышает 5 - 6.

По (1, Приложение 1) необходимо найти ближайший необходимый диаметр  $d'$ , а также  $d$  и сечение  $q$  неизолированного провода.

Диаметр голого провода = 1,35 мм.

Диаметр изолированного провода = 1,43 мм.

Сечение провода

$$q = \frac{\pi \cdot r^2}{2} = 1,431 \text{ мм}^2$$

Число элементарных проводников в одном эффективном

$c = 4$

После этого уточняем коэффициент заполнения паза

$$k = \frac{c \cdot N_1 \cdot d^2}{Q} = \frac{4 \cdot 17 \cdot 1,43}{218,03} = 0,63 \text{ } \ddot{\text{u}}$$

Плотность тока в обмотке статора

$$\gamma_1 = \frac{I_1}{c \cdot q \cdot a_1} = \frac{68,48}{4 \cdot 1,431 \cdot 2} = 5,98 \left[ \frac{A}{\text{мм}^2} \right]$$

Характеристикой тепловой нагрузки обмотки статора является произведение  $A_1 \cdot \gamma_1$ , пропорциональное плотности теплового потока. Поэтому при расчете двигателя определяют произведение и сравнивают его со средним допустимым значением из (1, рис.14). При применении изоляции классов, отличающихся от рекомендованных в (1, табл. 2), значения произведения  $A_1 \cdot \gamma_1$ , приведенные на рис.14, должны быть изменены в соответствии с (1, табл.16).

Характеристика тепловой нагрузки

$$A_1 \gamma_1 = 381,8 \cdot 5,98 = 1850 \left[ \frac{A^2}{\text{см} \cdot \text{мм}^2} \right]$$

Допустимые значения характеристики тепловой нагрузки с учетом:

$$A_1 \gamma_1 = 1950 \left[ \frac{A^2}{\text{см} \cdot \text{мм}^2} \right]$$

Средняя ширина катушки обмотки статора

$$b_{cp} = t_{cp} y_{n1} = 17,1 \cdot 10 = 171 \text{ мм}$$

где:  $t_{cp}$  - зубцовое деление статора в средней части паза

$$t_{cp} = \frac{\pi \cdot (D_1 + h_{n1})}{Z_1} = \frac{3,14 \cdot (233 + 28,5)}{48} = 17,1 \text{ мм}.$$

Средняя длина лобовой части катушки

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14 p) \cdot b_{cp} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 2) \cdot 171 + 15 = 261,24 \text{ мм}.$$

Средняя длина витка обмотки статора

$$l_{cp1} = 2 \cdot (l_1 + l_{л1}) = 2 \cdot (170 + 261,24) = 862 \text{ мм}$$

Длина вылета лобовых частей обмотки статора при  $h \geq 160 \text{ мм}$

$$l_{с1} = (0,12 + 0,15 p) \cdot b_{cp} + 10 = (0,12 + 0,15 \cdot 2) \cdot 171 + 10 = 81,82 \text{ мм}.$$

#### 4. Обмотка и пазы ротора, короткозамыкающее кольцо

У асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором пазы ротора обычно делаются полузакрытые или закрытые. Форма пазов, грушевидная или бутылочная, выбирается по. Выбираем грушевидный закрытый паз.

Зубцовое деление по наружному диаметру ротора

$$t_2 = \frac{\pi \cdot D_{H2}}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 231,6}{38} = 19,1 \text{ мм.}$$

Размеры грушевидных полузакрытых и закрытых пазов ротора выбирают таким образом, чтобы ширина зубца ротора была одинаковой по высоте.

Ширина зубца ротора

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{B_{z2} \cdot k_{c2}} = \frac{0,77 \cdot 19,1}{1,775 \cdot 0,97} = 8,5 \text{ мм};$$

где  $B_{z2}$  - магнитная индукция в зубцах ротора по (1, табл.18), принято  $B_{z2} = 1,775$  [Тл].

Определим размеры паза и площадь поперечного сечения пазов ротора.

Высота шлица  $h_{ш2} = 0,7 \text{ мм};$

Ширина шлица  $b_{ш2} = 1,5 \text{ мм};$

Высота монтка  $h_2 = 0,3 \text{ мм}.$

Большой радиус паза

$$r_1 = \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2h_{ш} - 2h_2) - Z_2 b_{z2}}{2 \cdot (Z_2 + \pi)} = \frac{\pi \cdot (231,6 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 38 \cdot 8,5}{2 \cdot (38 + \pi)} = 4,8 \text{ мм},$$

Затем по (1, рис.16) определим высоту паза  $h_{n2}$ , после чего определим индукцию в спинке ротора.

Высота паза  $h_{n2} = 45,5$  мм.

Индукция в спинке ротора

$$B_{c2} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2l_{\text{эф}} \cdot h_{c2}},$$

где:  $l_{\text{эф}2} = k_{c2} \cdot l_2 = 0,97 \cdot 170 = 164,9$  мм - расчетная высота спинки ротора, при  $2p = 4$

$$h_{c2} = \frac{2+p}{3,2p} \cdot \left( \frac{D_{H2}}{2} - h_{n2} \right) - \frac{2}{3} d_{k2} = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} \left( \frac{231,6}{2} - 45,5 \right) - \frac{2}{3} \cdot 0 = 43,75 \text{ мм}$$

- диаметр аксиальных вентиляционных каналов ( $dk2=0$ ).

$$B_{C2} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2 \cdot l_{\text{эф}2} \cdot h_{C2}} = \frac{0,01487 \cdot 10^6}{2 \cdot 164,9 \cdot 43,75} = 1,03 \text{ Тл}$$

Полученное значение  $B_{C2}$  сравнивают с наибольшим допустимым значением из (1, табл.19).

$$B_{C2\text{max}} = 1,25 \text{ Тл}$$

Меньший радиус паза

$$r_2 = \frac{\pi \cdot (D_{H2} - 2h_{n2}) - Z_2 \cdot \sigma_{z2}}{2 \cdot (Z_2 - \pi)} = \frac{\pi \cdot (231,6 - 2 \cdot 45,5) - 38 \cdot 8,5}{2 \cdot (38 - \pi)} = 1,69 \text{ мм}$$

Расстояние между центрами радиусов

$$h_1 = h_{n2} - h_{u2} - h_2 - r_1 - r_2 = 45,5 - 0,7 - 0,3 - 4,8 - 1,69 = 36 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения стержня, равная площади поперечного сечения паза в штампе

$$q_{cm} = Q_{n2} = \frac{\pi}{2} (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) h_1 = \frac{\pi}{2} (4,8^2 + 1,69^2) + (4,8 + 1,69) \cdot 36 = 274,1 \text{ мм}^2$$

Короткозамыкающее кольцо отливается из алюминия одновременно с заливкой пазов.

Поперечное сечение короткозамыкающего кольца.

$$q_k = \frac{(0,35 \dots 0,45) Z_2 q_{cm}}{2p} = \frac{0,45 \cdot 38 \cdot 274,1}{4} = 1171,7 \text{ мм}^2$$

Высота кольца (1, рис.17):

$$h_k = (1,1 \dots 1,25) h_{n2} = 1,25 \cdot 45,5 = 56,8 \text{ мм}$$

Длина кольца

$$l_k = \frac{q_k}{h_k} = \frac{1171,7}{56,8} = 20,6 \text{ мм}$$

Средний диаметр кольца

$$D_{kcp} = D_{H2} - h_k = 231,6 - 56,8 = 174,8 \text{ мм}$$

## 5. Параметры двигателя для рабочего режима

При изучении теории асинхронной машины было установлено, что асинхронный двигатель в общем случае аналогичен трансформатору, у которого изменяется не только ЭДС и ток вторичной обмотки, но и их частота. Схема замещения асинхронной машины так же аналогична схеме замещения трансформатора и отличается лишь тем, что здесь вместо

активного сопротивления  $r_2$  берется  $r_2/s$ ;  $s$  - скольжение. Параметры схемы замещения называются также параметрами асинхронной машины.

У нормальных асинхронных машин при изменении режима работы от холостого хода до номинальной нагрузки параметры можно считать постоянными. Задачей этого раздела является определение параметров схемы замещения для рабочего режима.

### 1.1 Активное сопротивление обмоток

Как известно, сопротивление проводника постоянному току пропорционально длине, обратно пропорционально сечению и зависит от

материала проводника, т.е.

$$R = \frac{l}{\gamma_{\theta} \cdot S}$$

Удельная проводимость проводника  $\gamma_{\theta}$  зависит от температуры, поэтому при определении сопротивления принято оговаривать температуру. Согласно ГОСТ 183-68 за расчетную рабочую температуру для машин с изоляцией классов А, Е и В принимают температуру  $75^{\circ}\text{C}$ , а для обмоток с изоляцией класса F и H принимается температура  $115^{\circ}\text{C}$ .

При переменном токе сопротивление обмотки называется активным и определяется по формуле:

$$r_1 = \frac{w_1 \cdot l_{cp}}{\gamma_{\theta 1} \cdot a_1 \cdot c \cdot q_1 \cdot 10^3} = \frac{68 \cdot 862}{47 \cdot 2 \cdot 4 \cdot 1,431 \cdot 10^3} = 0,11 \text{ Ом}$$

где:  $\gamma_{\theta 1} = \frac{47 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  - удельная проводимость меди при расчетной рабочей температуре.

Активное сопротивление обмотки фазы в относительных единицах

$$r_1^c = r_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = \frac{0,11 \cdot 68,48}{220} = 0,034 \text{ Ом}$$

Активное сопротивление обмотки ротора, выполненной в виде беличьей клетки, рассчитывается следующим образом. Беличью клетку можно рассматривать как многофазную обмотку с числом фаз, равным числу стержней  $Z_2$ . Причем в каждую фазу входит один стержень, поэтому число витков  $w_2 = \frac{1}{2}$ . Токи стержней  $I_c$  замыкаются через короткозамыкающие кольца (1, рис.18) и сдвинуты между собой по фазе на угол

$$\alpha = \frac{2\pi \cdot p}{Z_2}$$

Сопротивления  $r_c$  стержней и  $r_k$  части короткозамыкающего кольца, заключенной между соседними стержнями, определяются из формул:

$$r_c = \frac{l_2}{\gamma_{\theta 2} \cdot q_{cm} \cdot 10^3} = \frac{170}{21 \cdot 274,1 \cdot 10^3} = 0,0295 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$r_k = \frac{D_{Kcp}}{\gamma_{\theta 2} \cdot p \cdot q_k \cdot k_{np2} \cdot 10^3} = \frac{174,8}{21 \cdot 2 \cdot 1171,7 \cdot 0,3307 \cdot 10^3} = 0,0107 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

где:  $\gamma_{\Theta 2} = 21 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  - удельная проводимость алюминия при расчетной температуре.

$k_{np2} = \frac{\pi \cdot 2 p}{z_2} = \frac{\pi \cdot 4}{38} = 0,3307$  - коэффициент приведения тока кольца к току стержня.

Сопротивление фазы обмотки в виде беличьей клетки

$$r_2 = r_c + r_k$$

Полученное сопротивление необходимо привести к обмотке статора. Для этого необходимо рассчитать коэффициент приведения параметров беличьей клетки к обмотке статора:

$$k_{np1} = \frac{m_1}{m_2} \left( \frac{w_1 k_{01}}{w_2 k_{02}} \right)^2 = \frac{4 m_1}{Z_2} \left( \frac{w_1 k_{01}}{k_{ck}} \right)^2 = \frac{4 \cdot 3}{38} \cdot \left( \frac{68 \cdot 0,925}{0,997} \right)^2 = 1,2537 \cdot 10^3$$

где:  $k_{ck} = \frac{2 \sin \frac{\alpha_{ck}}{2}}{\alpha_{ck}} = 0,997$  - коэффициент скоса пазов ротора,  
 $\alpha_{ck}$  - центральный угол скоса пазов (в радианах)

$$\alpha_{ck} = \pi \frac{2p}{Z_1} = \frac{\pi \cdot 4}{48} = 0,2618 \text{ рад.}$$

Так как  $m_2 = z_2$ ;  $w_2 = \frac{1}{2}$ ;  $k_{02} = 1$ , то сопротивление приведенной обмотки ротора

$$r_2' = r_2 \cdot k_{np1} = (r_c + r_k) \cdot k_{np1} = (0,0295 + 0,0107) \cdot 10^{-3} \cdot 1,2537 \cdot 10^3 = 0,0503 \text{ Ом}$$

Так как в рабочих режимах скольжение двигателя мало и частота тока ротора мала, то увеличение сопротивления за счет эффекта вытеснения тока на поверхность здесь не учитывается. Приведенное сопротивление обмотки ротора в относительных единицах:

$$r_2^{*'} = r_2' \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,05003 \cdot \frac{68,48}{220} = 0,0157$$

Значение  $r_2^{*'}$  приблизительно равно скольжению при номинальной нагрузке, т.к.

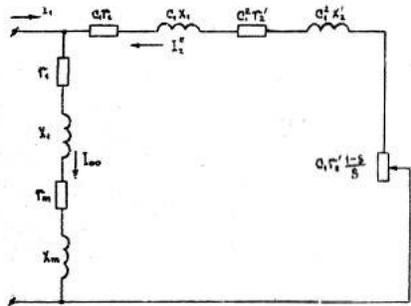
$$s_H = \frac{I_{2H}' r_2' \dot{i}_2' \dot{i}_2'}{E_2' \dot{i}_2'}$$

## 2 Индуктивное сопротивление

Теория асинхронной машины основана на ее аналогии с трансформатором. Схема замещения асинхронной машины при вращающемся роторе аналогична схеме замещения трансформатора, разница состоит в том, что частота вторичной цепи (ротора) и активное сопротивление ротора  $r_2'/s$  будут зависеть от скольжения (1, рис.19). Часто на схемах замещения

сопротивление  $r_2'/s$  представляют в виде двух сопротивлений  $r_2'$  и  $r_2' \left( \frac{1-s}{s} \right)$ .

При этом на схеме замещения параметры ротора  $r_2'$  и  $x_2'$  относятся к неподвижной машине. Параметры этой схемы замещения также называются параметрами асинхронной машины. Параметры  $r_1$  и  $r_2'$  были определены выше. Индуктивные сопротивления рассеяния и главное индуктивное сопротивление, обычно называемое сопротивлением взаимной индукции, отличаются. Это разделение происходит потому, что магнитное поле машины подразделяется на основное и поле рассеяния. Основной магнитный поток  $\Phi_\delta$  проходит через воздушный зазор и сцеплен с обмотками статора и ротора, а потоки рассеяния  $\Phi_{\sigma 1}$  и  $\Phi_{\sigma 2}$  сцеплены только со своими обмотками. Сопротивление обмотки (например, статора) складывается из главного индуктивного сопротивления, которое обычно называют сопротивлением взаимной индукции  $x_{12}$  и сопротивления рассеяния  $x_{\sigma 1}$ . т.е.  $x_{11} = x_{12} + x_{\sigma 1}$ . Обычно вместо  $x_\sigma$  пишут  $x_1$ .



Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

Точное определение потокосцеплений рассеяния и индуктивных сопротивлений рассеяния очень затруднительно, поэтому обычно пользуются эмпирическими формулами, дающими достаточно хорошие результаты. Сущность расчета сводится к тому, что поле рассеяния статора и ротора разделяют на три составляющих: пазовое, дифференциальное и лобовых частей обмотки. Если ввести коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния  $\lambda_p$ , дифференциального рассеяния  $\lambda_d$  и рассеяния лобовых частей  $\lambda_l$ , отнесенное к единице расчетной длины статора (или ротора)  $l_1$ , то можно по аналогии с индуктивным сопротивлением взаимной индукции записать формулу для индуктивного сопротивления рассеяния.

$$x_1 = 0,0158 \frac{f_1}{100} \cdot \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_1'}{p \cdot q_1} \cdot \sum \lambda_1, \text{ Ом}$$

$$\text{где: } \sum \lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{d1} + \lambda_{л1}$$

Таким образом, для расчета  $x$  необходимо вначале рассчитать значение коэффициента магнитной проводимости рассеяния.

## 2.1 Коэффициент магнитной проводимости рассеяния статора

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния  $\lambda_n$  зависит от геометрических размеров паза и наличия укорочения шага обмотки. При диаметральном шаге значение  $\lambda_n$  определяется по потокосцеплению индукционных линий, проходящих поперек паза, с проводниками, лежащими в пазу. Магнитным сопротивлением индукционных трубок вне паза при этом пренебрегают. При укороченном шаге обмотки значение  $\lambda_n$  зависит от относительного шага обмотки  $\beta$ , так как при  $\beta \neq 1$  в некоторых пазах находятся стороны катушек разных фаз, поэтому потокосцепление какой-либо катушечной стороны в этих пазах уменьшается. Это уменьшение учитывается путем введения в формулы для  $\lambda$  коэффициентов  $k_\beta$  и  $k'_\beta$ , зависящих от  $\beta$  (1, рис.20).

Коэффициенты влияния укорочения шага на пазовое рассеяние:

$$\text{при } \beta = 0,833 \quad k'_\beta = 0,87$$

$$k_\beta = 0,9$$

Для трапецеидальных пазов, наиболее употребляемых в машинах мощностью до 100 кВт, значение  $\lambda_n$  определяется по формуле

$$\lambda_{n1} = \frac{h_{n1}}{3b_2} \cdot k_\beta + \left( \frac{h_2}{b_2} + \frac{3h_k}{b_2 + 2b_{u1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \right) \cdot k'_\beta = \frac{28,5}{3 \cdot 9,09} \cdot 0,9 + \left( \frac{0}{9,09} + \frac{3 \cdot 2,7}{9,09 + 2 \cdot 3,7} + \frac{1}{3,7} \right) \cdot 0,87 = 1,61$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния учитывает рассеяние, обусловленное высшими гармониками поля, так как волна магнитного потока практически никогда не получается синусоидальной. Если сложить ЭДС от высших гармоник и отнести сумму к ЭДС от первой гармоники поля, то получим коэффициент, характеризующий дифференциальное рассеяние.

$$k_{\delta 1} = \frac{\sum E_{\gamma}}{E_1} = \frac{x_{\delta 1}}{x_{12}}$$

Значение  $k_{\delta 1}$  зависит от шага обмотки  $u_1$  и числа пазов на полюс и фазу  $q_1$  и их можно определить из (1, табл. 21).

$$k_{\delta 1} = 0,0062$$

На  $k_{\delta 1}$  влияет открытие пазов статора и ротора, т.е. размер щели (вщ). Это учитывается введением в формулу для коэффициента магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора коэффициента воздушного зазора  $k_{\delta}$  и коэффициента  $k_{u1}$ , определяемого по формуле

$$k_{u1} = 1 - \frac{0,033 \cdot b_{u2}^2}{t_1 \cdot \delta} = 1 - \frac{0,033 \cdot (3,7)^2}{15,24 \cdot 0,7} = 0,958$$

С учетом этого коэффициента формула для  $\lambda_{\delta 1}$  имеет вид

$$\lambda_{\delta 1} = \frac{0,9 \cdot (t_1 \cdot k_{\delta 1})^2 \cdot k_{\rho 1} \cdot k_{u1} \cdot k_{\delta 1}}{\delta \cdot k_{\delta}} = \frac{0,9 \cdot (15,24 \cdot 0,925)^2 \cdot 0,85 \cdot 0,958 \cdot 0,0062}{0,7 \cdot 1,17} = 1,102$$

где:  $k_{\rho 1}$  - коэффициент, учитывающий демпфирующую реакцию токов, определяется по (1, табл.22).  $k_{\rho 1} = 0,85$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния лобовых частей определяется по эмпирической формуле

$$\lambda_{\sigma 1} = 0,34 \frac{q_1}{l_1} \cdot (l_{\sigma 1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \frac{4}{170} (261,24 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 183) = 1,309$$

$$\text{где } \tau = \frac{\pi \cdot D_1}{2 p} = \frac{\pi \cdot 233}{4} = 183 \text{ мм}$$

Суммарный коэффициент магнитной проводимости обмотки статора:

$$\sum \lambda_1 = \lambda_{n1} + \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 1} = 1,61 + 1,102 + 1,309 = 4,021$$

Тогда индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора:

$$x_1 = 0,0158 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_1}{p \cdot q_1} \cdot \sum \lambda_1 = 0,0158 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left( \frac{68}{100} \right)^2 \cdot \frac{170}{2 \cdot 4} \cdot 4,021 = 0,311 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в о.е.

$$x_1^{\text{с}} = x_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,311 \cdot \frac{82,35}{220} = 0,096$$

## 2.2 Коэффициент магнитной проводимости рассеяния ротора

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора овального закрытого паза

$$\lambda_{n2} = \left[ \frac{h_1 + 0,8 r_2}{6 \cdot r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_1^2}{2 q_{cm}} \right)^2 + 0,66 - \frac{g_{m2}}{4 r_1} \right] \cdot \psi + 0,3 + 1,12 \cdot \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2} =$$

$$\left[ \frac{36 + 0,8 \cdot 1,69}{6 \cdot 4,8} \left( 1 - \frac{\pi \cdot 4,8^2}{2 \cdot 274,1} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 4,8} \right] \cdot 1 + 0,3 + 1,12 \frac{0,3 \cdot 10^3}{625,7} = 1,991$$

где:  $\psi$  - коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока; определяется по (1, рис. 21) в зависимости от величины  $\xi$ , зависящей от степени повышения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений клетки ротора. Для рабочего режима  $\psi = 1$ .  
Значение тока  $I_2$  в стержнях ротора

$$I_2 = \frac{2 \cdot W_{1\phi} \cdot P_1 \cdot (0,2 + 0,8 \cdot \cos \phi)}{U_1 \cdot Z_2} = \frac{2 \cdot 62,9 \cdot 45200 \cdot (0,2 + 0,8 \cdot 0,9)}{220 \cdot 38} = 625,7 \text{ А}$$

Здесь  $P_1$  и  $\cos \phi$  для номинального режима.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния

$$\lambda_{\partial 2} = \frac{0,9 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{z_2}{6p}\right)^2}{\delta \cdot k_{\delta}} \cdot k_{\partial 2} = \frac{0,9 \cdot 19,1 \cdot \left(\frac{38}{6 \cdot 2}\right)^2}{0,7 \cdot 1,17} \cdot 0,00983 = 2,068$$

где:  $k_{\partial 2}$  - коэффициент дифференциального рассеяния ротора, определяемый

по (1, рис. 22). Для  $q_2 = \frac{z_2}{6p} = \frac{38}{6 \cdot 2} = 3,17$   $k_{\partial 2} = 0,00983$ .

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния короткозамыкающих колец литой клетки (лобовых частей ротора) рассчитывается по формуле:

$$\lambda_{\lambda 2} = \frac{2,3 D_{кр}}{Z_2 \cdot l_2 \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 D_{кр}}{2h_k + 2l_k} = \frac{2,3 \cdot 174,8}{38 \cdot 170 \cdot 0,3292^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 174,8}{2 \cdot 56,8 + 2 \cdot 20,6} = 0,413$$

где  $\Delta = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{38} = 0,3292$

При наличии скоса пазов, который делается для уменьшения шума и паразитных моментов, индуктивные сопротивления статора и ротора несколько возрастают, что приводит к уменьшению  $M_p$  и  $M_{\max}$ . Увеличение индуктивных сопротивлений учитывается путем введения коэффициента скоса  $\lambda_{ск}$

$$\lambda_{ск} = \frac{t_2 \cdot \beta_{ск}}{9,5 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} = \frac{19,1 \cdot 0,797^2}{9,5 \cdot 0,71,17} = 1,559$$

где:  $\beta_{ск}$  - скос пазов в долях зубцового деления ротора  $\beta_{ск} = \frac{t_1}{t_2} = \frac{15,24}{19,1} = 0,797$   
 Суммарный коэффициент магнитной проводимости ротора

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{н2} + \lambda_{\delta 2} + \lambda_{л 2} + \lambda_{ск} = 1,991 + 2,068 + 0,413 + 1,559 = 6,031$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора

$$x_2 = 7,9 f_1 \cdot l_2 \cdot \sum \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 170 \cdot 6,031 \cdot 10^{-9} = 0,405 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния ротора, приведенное к обмотке статора

$$x_2' = k_{np1} \cdot x_2 = 1,2537 \cdot 10^3 \cdot 0,405 \cdot 10^{-3} = 0,507 \text{ Ом}$$

в относительных единицах

$$x_2' \cdot i_2 \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,507 \cdot \frac{68,48}{220} = 0,1578$$

### 3 Намагничивающий ток

Магнитная цепь асинхронного двигателя симметрична, поэтому расчет намагничивающих сил и намагничивающего тока достаточно выполнить для одной пары полюсов. Магнитную цепь машины обычно разбивают на участки, на протяжении которых магнитную индукцию можно считать постоянной. Такими участками являются: воздушный зазор, зубцы статора, спинка статора, зубцы ротора и спинка ротора. Ход расчета заключается в определении для каждого из названных участков магнитной индукции при известных размерах и сечении участка, а по определенной индукции на участке находят напряженность магнитного поля, после чего умножают ее на среднюю длину магнитной силовой линий на участке и определяют магнитное напряжение участка. Суммируя магнитные напряжения всех участков магнитной цепи рассчитывают суммарную М.Д.С. и намагничивающий ток.

Значения магнитной индукции на участках магнитной цепи должны находится в целесообразных пределах, т.к. увеличение магнитной индукции

не только повышает намагничивающий ток и понижает КПД двигателя, но и увеличивает потери в стали двигателя, вызывает местные перегревы стали. При малых значениях магнитной индукции ухудшается использование активных материалов, увеличивается масса и стоимость двигателя.

### 3.1 Воздушный зазор

Магнитное напряжение воздушного зазора на один полюс

$$F_{\delta} = 0,08 \delta \cdot k_{\delta} B_{\delta} \cdot 10^4, \text{ A}$$

где:  $k_{\delta}$  - коэффициент воздушного зазора, учитывающий влияние зубчатости статора и ротора на магнитное сопротивление.

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_k$$

где:  $k_{\delta 1}$  и  $k_{\delta 2}$  - коэффициенты, учитывающие соответственно зубчатость статора и ротора;  $k_k$  - коэффициент, учитывающий уменьшение магнитного сопротивления зазора вследствие ответвления части магнитного потока в радиальные каналы.

При полузакрытых пазах статора и ротора

$$k_{\delta 1} = 1 + \frac{b_{u1}}{t_1 - b_{u1} + \frac{5t_1 \cdot \delta}{b_{u1}}} = 1 + \frac{3,7}{15,24 - 3,7 + \frac{5 \cdot 15,24 \cdot 0,7}{3,7}} = 1,143$$

$$k_{\delta 2} = 1 + \frac{b_{u2}}{t_2 - b_{u2} + \frac{5t_2 \cdot \delta}{b_{u2}}} = 1 + \frac{1,5}{19,1 - 1,5 + \frac{5 \cdot 19,1 \cdot 0,7}{1,5}} = 1,024$$

Т.к. радиальные вентиляционные каналы отсутствуют, то  $k_k = 1$ .

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} \cdot k_k = 1,143 \cdot 1,024 \cdot 1 = 1,17$$

Магнитное напряжение воздушного зазора на полюс

$$F_{\delta} = 0,08 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot 10^4 = 0,08 \cdot 0,7 \cdot 1,17 \cdot 0,7508 \cdot 10^4 = 491 \text{ A}$$

### 3.2 Зубцы статора

При трапецеидальных полузакрытых пазах зубцы имеют равновеликое поперечное сечение, поэтому магнитная индукция в зубцах постоянна по длине зубца.

Магнитная индукция в расчетном сечении зубца статора:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{k_c \cdot b_{z1}} = \frac{0,7508 \cdot 15,24}{0,97 \cdot 6,66} = 1,71 \text{ Тл}$$

Ширина зубца статора в расчетных сечениях

$$b'_{z1} = \frac{\pi(D_1 + 2h_{n1})}{z_1} - b_1 = \frac{\pi(233 + 2 \cdot 28,5)}{48} - 12,3 = 6,68 \text{ мм}$$

$$b''_{z1} = \frac{\pi(D_1 + 2h_{u1} + b_2 - b_{u1})}{z_1} - b_2 = \frac{\pi(233 + 2 \cdot 1 + 9,09 - 3,7)}{48} - 9,09 = 6,64 \text{ мм}$$

$$b_{z1cp} = \frac{b'_{z1} + b''_{z1}}{2} = \frac{6,68 + 6,64}{2} = 6,66 \text{ мм}$$

Напряженность магнитного поля в зубце определяется по (1, приложение 2).  
 $H_{z1} = 14$

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце

$$L_{z1} = h_{n1} = 28,5 \text{ мм}$$

Магнитное напряжение зубцов статора.

$$F_{z1} = 0,1 H_{z1} \cdot L_{z1} = 0,1 \cdot 14 \cdot 28,5 = 39,9 \text{ А}$$

### 3.3 Зубцы ротора

При грушевидных закрытых пазах ротора индукция в равновеликом поперечном сечении зубца

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{k_{c2} \cdot b_{z2}}$$

Ширина зубца ротора в расчетных сечениях

$$b'_{z2} = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{u2} - 2r_1)}{Z_2} - 2r_1 = \frac{\pi(231,6 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 4,8)}{38} - 2 \cdot 4,8 = 8,63 \text{ мм}$$

$$b''_{z2} = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{n2} - 2r_2)}{Z_2} - 2r_2 = \frac{\pi(231,6 - 2 \cdot 45,5 - 2 \cdot 1,69)}{38} - 2 \cdot 1,69 = 7,96 \text{ мм}$$

$$b_{z2cp} = \frac{b'_{z2} + b''_{z2}}{2} = \frac{8,63 + 7,96}{2} = 8,29 \text{ мм}$$

Магнитная индукция в расчетных сечениях

$$B_{z2min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{k_{c2} \cdot b'_{z2}} = \frac{0,7508 \cdot 19,1}{0,97 \cdot 8,63} = 1,71 \text{ Тл}$$

$$B_{z2max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{k_{c2} \cdot b''_{z2}} = \frac{0,7508 \cdot 19,1}{0,97 \cdot 7,96} = 1,85 \text{ Тл}$$

$$B_{z2cp} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{k_{c2} \cdot b_{z2cp}} = \frac{0,7508 \cdot 19,1}{0,97 \cdot 8,29} = 1,77 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитного поля при  $B_{z2} > 1,8$  Тл определяется по (1, приложение 5) с учетом коэффициента  $k_z$ , учитывающий отклонение магнитного потока в паз ротора, который определяется на  $\frac{1}{3}$  высоты зубца, считая от наиболее узкой части паза.

$$k_{z(\frac{1}{3})} = \frac{t_{2(\frac{1}{3})}}{k_c \cdot b_{z2}}$$

где:

$$t_{2(\frac{1}{3})} = \frac{\pi \cdot (D_{H2} - \frac{4}{3} h_{n2})}{Z_2} = 14,13$$

Тогда:  $k_{z(\frac{1}{3})_{\max}} = 1,83$ ,  $k_{z(\frac{1}{3})_{cp}}$  и  $k_{z(\frac{1}{3})_{\min}}$  не рассчитываются, т.к. для них  $B_{z2} < 1,8$  Тл. Соответственно, напряженности поля в расчетных сечениях зубца ротора будут равны:

$$H_{z2 \min} = 11,8 \text{ А/см}$$

$$H_{z2 \max} = 15 \text{ А/см}$$

$$H_{z2 cp} = 14 \text{ А/см}$$

Расчетное значение напряженности магнитного поля в зубце ротора

$$H_{z2} = \frac{H_{z2 \max} + 4H_{z2 cp} + H_{z2 \min}}{6} = \frac{11,8 + 4 \cdot 14 + 15}{6} = 13,8 \left[ \frac{A}{cm} \right]$$

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце

$$L_{z2} = h_{n2} - 0,2r_2 = 45,5 - 0,2 \cdot 1,69 = 45,16 \text{ мм}$$

Магнитное напряжение зубцов ротора.

$$F_{z2} = 0,1 H_{z2} L_{z2} = 0,1 \cdot 13,8 \cdot 45,16 = 62,32 \text{ А}$$

### 5.3.4 Спинка статора

Магнитная индукция в спинке статора

$$B_{c1} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2 \cdot l_{\varphi 1} \cdot h_{c1}} = \frac{0,01487 \cdot 10^6}{2 \cdot 164,9 \cdot 29,5} = 1,53 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитного поля Нс1 определяется по (1, приложение 7):

$$H_{c1} = 5,86 \text{ А/см}$$

Расчетная длина магнитной силовой линии в зубце

$$L_{c1} = \frac{\pi(D_{H1} - h_{c1})}{4p} = \frac{\pi(349 - 29,5)}{4 \cdot 2} = 125,46 \text{ мм.}$$

Магнитное напряжение спинки статора

$$F_{c1} = 0,1 H_{c1} L_{c1} = 0,1 \cdot 5,86 \cdot 125,46 = 73,52 \text{ А}$$

3.5 Спинка ротора

Магнитная индукция в спинке ротора

$$B_{c2} = \frac{\Phi_{\delta} \cdot 10^6}{2 \cdot l_{\varphi 2} \cdot h_{c2}} = \frac{0,01487 \cdot 10^6}{2 \cdot 164,9 \cdot 43,75} = 1,03 \text{ Тл}$$

Напряженность магнитного поля Нс2 определяются по:

$$H_{c2} = 1,85 \text{ А/см}$$

Расчетная длина магнитной силовой линии спинки ротора при  $2p \geq 4$

$$L_{c2} = \frac{\pi \left( D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3} d_{k2} \right)}{4p} = \frac{\pi \left( 80 + 43,75 + \frac{4}{3} \cdot 0 \right)}{4 \cdot 2} = 48,63 \text{ мм.}$$

Магнитное напряжение спинки ротора

$$F_{c2} = 0,1 H_{c2} L_{c2} = 0,1 \cdot 1,85 \cdot 48,63 = 8,99 \text{ А}$$

### 3.6 Параметры магнитной цепи

Намагничивающая сила магнитной цепи на один полюс:

$$\sum F = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} = 491 + 39,9 + 62,32 + 73,52 + 8,99 = 675,73 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_n = \frac{\sum F}{F_{\delta}} = \frac{675,73}{491} = 1,376$$

Намагничивающий ток:

$$I_{0\mu} = \frac{2,22 \sum F \cdot p}{m_1 \cdot W_{\text{эф1}}} = \frac{2,22 \cdot 675,73 \cdot 2}{3 \cdot 62,9} = 15,89 \text{ А}$$

в % от номинального тока:

$$I_{\mu} \% = \frac{I_{\mu}}{I_n} \cdot 100 \% = \frac{15,89}{68,48} \cdot 100 \% = 23,2 \%$$

Главное индуктивное сопротивление:

$$x_m = \frac{E}{I_{\mu}} = \frac{0,978 \cdot 220}{15,89} = 13,57 \text{ Ом}$$

в относительных единицах:

$$x_m * i_m \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 13,57 \cdot \frac{68,48}{220} = 4,22$$

Коэффициент рассеяния статора:

$$\tau_1 = \frac{x_1}{x_m} = \frac{0,311}{13,57} = 0,0229$$

Коэффициент сопротивления статора:

$$\rho_1 = \frac{r_1}{x_1 + x_m} = \frac{0,11}{0,311 + 13,57} = 0,00793$$

## 6. Потери холостого хода

При работе асинхронного двигателя часть подведенной к нему мощности теряется в виде потерь. Так как асинхронный двигатель представляет собой вращающийся электромагнитный преобразователь энергии, то в нем возникают механические и электрические потери, называемые потерями холостого хода.

Механические потери состоят из потерь на трение в подшипниках и вращающихся частях, а также вентилятора о воздух. Вследствие того, что при изменении нагрузки двигателя скольжение его изменяется незначительно, то механические потери можно считать постоянными.

Потери в стали состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи; эти потери зависят от величины магнитной индукции, частоты перемагничивания, марки стали и толщины листов. Так как магнитная индукция пропорциональна подведенному напряжению, то потери в стали двигателя в рабочем режиме можно считать постоянными.

Кроме этого еще необходимо учитывать потери в обмотке статора, так как ток холостого хода асинхронного двигателя может достигать 60...70% от номинального тока, а также добавочные потери в стали.

При расчете потерь в стали статора определяют вес стали зубцов и спинки статора и, зная удельные потери в стали данной марки при известной индукции, определяют суммарные потери в стали.

Для определения потерь в меди при холостом ходе необходимо определить ток холостого хода, считая его приблизительно равным намагничивающей составляющей тока холостого хода:

$$I_{\mu} = \frac{U_1}{x_m(1+\tau_1)(1+\rho_1)^2}.$$

Если коэффициент сопротивления статора  $\rho_1 \leq 0,1$ , то в дальнейшем принимают  $\rho_1 = 0$ .

Реактивная составляющая тока статора при идеальном холостом ходе:

$$I_\mu = \frac{U_1}{x_\mu(1+\tau_1)} = \frac{220}{13,57 \cdot (1+0,0229)} = 15,74 \text{ A}$$

Потери в обмотке статора при холостом ходе

$$P_{\text{Э}10} = 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 15,74^2 \cdot 0,11 = 83,32 \text{ Вт}$$

Расчетная масса стали зубцов статора

$$G_{z1} = 7,8 \cdot Z_1 \cdot b_{z1} \cdot h_{n1} \cdot l_{\text{эф}1} \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 48 \cdot 6,66 \cdot 28,5 \cdot 164,9 \cdot 10^{-6} = 11,7 \text{ кг}$$

Магнитные потери в зубцах статора при  $f_1 = 50$  Гц и толщине листов 0,5 мм выражаются зависимостью для стали марки 2013:

$$P_{z1} = 4,4 B_{z1cp}^2 \cdot G_{z1} = 4,4 \cdot 1,771^2 \cdot 11,7 = 161,4 \text{ Вт}$$

Расчетная масса стали спинки статора:

$$G_{c1} = 7,8 \pi (D_{H1} - h_{n1}) \cdot h_{c1} \cdot l_{\text{эф}1} \cdot 10^{-6} = 7,8 \pi (349 - 28,5) \cdot 29,5 \cdot 164,9 \cdot 10^{-6} = 38,2 \text{ кг}$$

Магнитные потери в спинке статора

$$P_{c1} = 4,4 B_{c1}^2 \cdot G_{c1} = 4,4 \cdot 1,53^2 \cdot 38,2 = 393,45 \text{ Вт}$$

Суммарные потери в стали статора при холостом ходе, включающие и добавочные потери в стали:

$$\Sigma P_{c1} = P_{z1} \left[ 1 + 2 \sqrt{\frac{t_1}{10} \cdot (k_\delta - 1)^3} \right] + P_{c1} = 161,4 \cdot \left[ 1 + 2 \sqrt{\frac{15,24}{10} \cdot (1,17 - 1)^3} \right] + 393,45 = 582,8 \text{ Вт}$$

Механические потери в двигателях со степенью защиты IP44 и способом охлаждения ICO141 (закрытое исполнение с внешним обдувом статора):

$$P_{mx} = K_{mx} \left( \frac{n_1}{1000} \right)^2 \cdot \left( \frac{D_{H1}}{100} \right)^4 = 1 \cdot \left( \frac{1475}{1000} \right)^2 \cdot \left( \frac{349}{100} \right)^4 = 322 \text{ Вт}$$

где  $k_{MX} = 1$  при  $2p \geq 4$

Активная составляющая тока холостого хода

$$I_{oa} = \frac{P_{\Sigma 10} + \sum P_{c1} + P_{mx}}{3 U_1} = \frac{83,32 + 582,8 + 322}{3 \cdot 220} = 1,5 \text{ А}$$

ТОК ХОЛОСТОГО ХОДА

$$I_o = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{o\mu}^2} = \sqrt{1,5^2 + 15,74^2} = 15,8 \text{ А}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \phi_o = \frac{I_{oa}}{I_o} = \frac{1,5}{15,8} = 0,095$$

## 7. Круговая диаграмма

Рабочие характеристики асинхронного двигателя можно получить путем непосредственной нагрузки двигателя или расчетным путем. На стадии проектирования, когда двигатель еще не построен, наиболее приемлемым является второй путь, когда рабочие характеристики строятся с помощью круговой диаграммы.

Для построения рабочих характеристик двигателя необходимо на круговой диаграмме построить линию полезной мощности, линию электромагнитной мощности и моментов, шкалы для определения  $\cos \phi$ ; скольжения и т.д.

Рассмотрим более подробно метод построения круговой диаграммы. Как известно, окружность можно построить, если известны две точки, лежащие на окружности, и положение центра окружности. Такими точками на окружности могут быть точка холостого хода ( $s=0$ ) и точка короткого замыкания ( $s=1$ ). Для определения положения этих точек необходимо определить расчетным путем или из опыта ток холостого хода  $I_o$  и  $\cos \phi_o$  и ток короткого замыкания  $I_{кн}$  и  $\cos \phi_k$  при полном напряжении  $U_{1н}$ .

Так как на стадии проектирования самого двигателя еще нет, поэтому лучше получить точки х.х. и к.з. расчетным путем. Вначале необходимо рассчитать параметры схемы замещения  $c_1 r_1$ ;  $c_1 x_1$ ;  $c_1^2 x_2'$ ;  $c_1^2 r_2'$ ;  $x_k$ ;  $r_k$ , где  $c_1$  - комплексный коэффициент, равный

$$c_1 = \sqrt{\frac{(r_1 + r_m)^2 + (x_1 + x_m)^2}{r_m^2 + x_m^2}} = \sqrt{\frac{(0,11 + 0,6342)^2 + (0,2324 + 13,57)^2}{(0,6342)^2 + (13,57)^2}} = 1,022$$

$$\text{где } r_m = \frac{\Sigma P_{c1}}{3 I_\mu^2} = \frac{582,8}{3 \cdot (15,89)^2} = 0,6342 \text{ Ом}$$

Для построения точки идеального холостого хода ( $s=0$ ) определим сумму основных потерь в стали и потерь в меди при холостом ходе:

$$P_o = P_{\Sigma 10} + \Sigma P_{C1} = 83,32 + 582,8 = 837,3 \text{ Вт}$$

Диаметр окружности тока в Амперах:

$$D_k = \frac{U_1}{x_k} = \frac{220}{0,7071} = 311,13 \text{ А}$$

Выбираем масштаб для тока таким образом, чтобы диаметр окружности в миллиметрах был равен 200 мм, т.е.  $\frac{D_k}{c_I} = 200$  мм.

$$c_I = \frac{D_k}{200} = 1,55565$$

Масштаб для мощности

$$c_p = 3 \cdot U_1 \cdot c_I \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 220 \cdot 1,55565 \cdot 10^{-3} = 1,02673 \left[ \frac{\text{кВт}}{\text{мм}} \right].$$

После этого приступаем к построению круговой диаграммы:

а) по оси абсцисс отложим отрезок

$$O_1 O_2 = \frac{I_{om}}{c_I} = \frac{15,74}{1,55565} = 12,73 \text{ , мм;}$$

б) из точки  $O_2$  восстановим перпендикуляр к оси абсцисс, равный

$$O_2 A'_o = \frac{P_0}{c_p} = \frac{837,3 \cdot 10^{-3}}{1,02673} = 0,82 \text{ мм,}$$

получим точку идеального хода, в которой скольжение  $s=0$ ;

в) из точки  $A'_0$  проведем прямую, параллельную оси абсцисс, и на ней радиусом 100 мм из точки  $A'_0$ , как из центра, сделаем засечку в точке  $B$ ;

г) на прямой  $A'_0 B$  и ее продолжении отложим диаметр  $A'_0 D = \frac{D_k}{c_l} = 200$  мм и опишем окружность этим диаметром;

д) из точки  $B$  восстанавливаем перпендикуляр, на котором откладываем отрезки  $B F'$  и  $B F''$ , равные

$$B F' = 100 \operatorname{tg} \alpha_{(s=\infty)}; \quad B F'' = 100 \operatorname{tg} \alpha_{(s=1)},$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{(s=\infty)} = \frac{c_l r_1}{x_k} = \frac{1,022 \cdot 0,077}{0,7071} = 0,1113;$$

$$\operatorname{tg} \alpha_{(s=1)} = \frac{r_k}{x_k} = \frac{0,1122}{0,7071} = 0,1587$$

Тогда  $B F' = 100 \cdot 0,1113 = 11,13$  мм.,  $B F'' = 100 \cdot 0,1587 = 15,87$  мм.;

е) через точку  $A'_0$  и точки  $F'$  и  $F''$  проводим прямые до пересечения с окружностью в точках  $A'_{(s=\infty)}$  и  $A'_{(s=1)}$ . Так как в точках  $A'_0$  и  $A'_{(s=1)}$  полезная мощность двигателя  $P_2=0$ , то эта линия будет представлять линию полезной мощности. Электромагнитная мощность и вращающий момент двигателя равны нулю в точках  $s=\infty$  и  $s=0$ , поэтому линия  $A'_0 A'_{(s=\infty)}$  будет представлять линию электромагнитной мощности и момента;

ж) из середины отрезка  $A'_0 A'_{(s=\infty)}$  восстановим вверх перпендикуляр до пересечения с окружностью в точке  $A'_m$ , в которой двигатель развивает максимальный вращающий момент.  $A'_m A'_m = M_{\max} \cdot c_m$  без учета вытеснения тока в проводниках обмотки ротора и насыщения стали от полей рассеяния;

з) из точки  $O_1$  радиусом, равным 100 мм, проведем дугу окружности для определения  $\cos \phi$ ;

и) на линии полезной мощности выбираем произвольную точку  $P'$  и проводим из нее перпендикуляр к линии  $A'_0 B$  (вверх), на котором отложим отрезок

$$\overline{P'} P = \frac{P_{ном} + P_{мх} + P_{доб}}{c_p}, \text{ мм}$$

где:  $P_{ном} = 45$  кВт - номинальная мощность двигателя;

$P_{мх} = 0,3228$  кВт - механические потери;

$P_{доб}$  - добавочные потери при нагрузке, которые можно принять

равными  $0,005 \frac{P_n}{\eta_n}$ ;

$$\overline{P'} P = \frac{P_{ном} + P_{мх} + P_{доб}}{c_p} = \frac{45 + 0,3228 + 0,005 \cdot \frac{P_n}{\eta_n}}{1,02673} = 44,38 \text{ мм.};$$

к) через точку  $P$  проведем линию, параллельную  $A'_0 A_{(s=1)}$ , и получим точку  $A_4$ , соответствующую номинальному режиму;

л) строим шкалу скольжения. Для этого на окружности выбираем произвольную точку  $T$  и соединяем ее с точкой  $A_{(s=\infty)}$  и  $A_{(s=1)}$ . Затем параллельно линии  $TA_{(s=\infty)}$  проводим линию  $MN$  с таким расчетом, чтобы ее длина была равна 100 мм. Разделив отрезок  $MN$  на 10 частей, получим шкалу скольжений. Теперь из круговой диаграммы определим ток статора

$I_{1н} = O_1 A \cdot c_I$ ;  $\cos \phi_n = \frac{O_1 K}{100}$  и ток ротора.

$$I_{1н} = O_1 A_4 \cdot c_I = 52,5 \cdot 1,55565 = 81,7 \text{ A};$$

$$\cos \phi_n = O_1 K = 0,9;$$

$$I'_{2н} = A'_o A_4 \cdot c_I = 47 \cdot 1,55565 = 73,1 \text{ A}.$$

Полученные значения практически равны принятым в начале расчета.

Для построения рабочих характеристик двигателя, т.е. зависимостей  $\cos \phi$ ;  $\eta$ ;  $P_1$ ;  $s = f(P_2)$  с помощью круговой диаграммы поступают следующим образом.

На круговой диаграмме выбирают 5-6 точек в пределах от холостого хода (точка  $A_0$ ) до нагрузки  $P_2 = 1,25 P_{2н}$  (точка 5). Соединяя полученные точки (1-5) с началом координат  $O_1$  получим токи статора  $I_1$ , соответствующие выбранным точкам. Полученные на окружности точки соединим с точкой  $T$  и по шкале скольжения определим скольжение для каждой из точек.

Полезную мощность и К.П.Д. в каждой точке лучше определять расчетным путем. Для этого вначале определим подведенную мощность в каждой из точек как произведение  $P_1 = 3 U_1 I_1 \cos \phi$ . Зная токи статора и ротора (из круговой диаграммы) для каждой из точек определим потери в меди обмоток статора и ротора

$$P_{\sigma 1} = 3 I_1^2 r_1 \text{ и } P_{\sigma 2} = 3 (I'_2)^2 r'_2.$$

Добавочные потери можно принять равными  $P_{доб} = 0,005 P_1$ . Суммируя эти потери с найденными ранее потерями в стали и механическими, не зависящими от нагрузки, определим общие потери  $\sum P$ . Вычитая  $\sum P$  из  $P_1$ , найдем  $P_2$  для каждой из точек.

К.П.Д. найдем по формуле

$$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$$

Результаты расчетов лучше свести в таблицу, по которой затем построить рабочие характеристики.

### .1 Рабочие характеристики

Скольжение в точках Параметр  $s_1=0$   $s_2=$   
 $s_3=$   
 $s_4=$   
 $s_5=s_H=$   $s_6=$

|   |                                      |  |  |  |  |  |  |
|---|--------------------------------------|--|--|--|--|--|--|
| 0,02083   |                                      |  |  |  |  |  |  |
| $I_1, \text{ мм}$   | 12,418,22940,752,564,5               |  |  |  |  |  |  |
| $I_1, A = I_1 \cdot c_I$  | 15,84723,26037,06252,01567,09582,431 |  |  |  |  |  |  |
| $I_2, \text{ мм}$   | 0122435,54759                        |  |  |  |  |  |  |
| $I_2, A = I_2 \cdot c_I$  | 015,33630,67245,36960,06675,402      |  |  |  |  |  |  |
| $\cos \varphi$  | 0,090,720,840,900,900,88             |  |  |  |  |  |  |
| $P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$                                      | 0,94111,05320,54730,89739,85447,876  |  |  |  |  |  |  |
| $P_{\text{доб}} = 0,005 P_1, \text{ кВт}$   | 0,0050,0550,1030,1540,1990,239       |  |  |  |  |  |  |
| $P_{\text{с1}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$                          | 0,0290,0620,1570,3080,5130,775       |  |  |  |  |  |  |
| $P_{\text{с2}} = 3 \cdot (I_2')^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$                      | 00,0350,1420,3110,5440,858           |  |  |  |  |  |  |
| $P_{\text{мех}}, \text{ кВт}$   | 0,3340,3310,3280,3260,3230,320       |  |  |  |  |  |  |
| $P_c + P_{\text{мех}}, \text{ кВт}$   | 0,7270,7240,7220,7190,7160,713       |  |  |  |  |  |  |
| $\sum P = P_{\text{с1}} + P_{\text{с2}} + P_c + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}, \text{ кВт}$ | 0,7610,8771,1231,4921,9732,585       |  |  |  |  |  |  |
| $\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$   | 00,880,900,910,910,905               |  |  |  |  |  |  |
| $P_2 = P_1 - \sum P, \text{ кВт}$   | 0,18110,17619,42429,40437,28145,291  |  |  |  |  |  |  |



## 8. Начальный пусковой момент и начальный пусковой ток

При определении параметров машины для рабочего режима эффект вытеснения тока в обмотке ротора и влияние насыщения от полей рассеяния статора и ротора не учитывались, т.к. в рабочем режиме скольжение и частота тока ротора малы и указанными явлениями можно пренебречь. При пуске частота тока ротора велика и параметры машины необходимо определять с учетом этих факторов. Поэтому с учетом вытеснения тока сопротивление стержня клетки

$$r_{c\xi} = \frac{\ell_2}{\gamma_{\theta 2} \cdot q_{cm} \cdot 10^3} \cdot k_{sm}$$

где:  $k_{sm}$  - коэффициент вытеснения тока при частоте  $f_2 = f_1 \cdot s$ , зависит от значения  $\xi$ , характеризующего степень увеличения активного и уменьшения индуктивного сопротивлений клетки ротора.

Коэффициент вытеснения тока определяется в следующем порядке. Вначале определяется значение  $\xi$ :

$$\xi = 0,066 \cdot h_c \sqrt{s} = 0,066 \cdot 44,5 \cdot \sqrt{1} = 2,937$$

$$\text{где } h_c = h_{n2} - h_{u2} - h_2 = 45,5 - 0,7 - 0,3 = 44,5 \text{ мм.}$$

Затем определяют расчетную глубину проникновения тока в стержень:

$$h_p = \frac{h_c}{1 + \phi} = \frac{44,5}{1 + 1,9} = 15,34 \text{ мм}$$

где:  $\phi = 1,9$  по (1, рис.21) для  $\xi = 2,937$ .

Ширина стержня при расчетной глубине проникновения тока

$$b_p = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1} \cdot (h_p - r_1) = 2 \cdot 4,8 - \frac{2 \cdot (4,8 - 1,69)}{36} \cdot (15,34 - 4,8) = 7,79 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения стержня на расчетной глубине проникновения тока

$$q_p = \frac{\pi}{2} r_1^2 + \left( r_1 + \frac{b_p}{2} \right) \cdot (h_p - r_1) = \frac{\pi}{2} \cdot (4,8)^2 + \left( 4,8 + \frac{7,79}{2} \right) \cdot (15,34 - 4,8) = 127,83 \text{ мм}^2$$

Коэффициент вытеснения тока

$$k_{em} = \frac{q_{cm}}{q_p} = \frac{274,1}{127,83} = 2,144$$

Тогда активное сопротивление стержня клетки

$$r_{c\xi} = \frac{l_2}{\gamma_{\theta 2} q_{cm} \cdot 10^3} k_{em} = \frac{170}{21 \cdot 274,1 \cdot 10^3} \cdot 2,144 = 0,0633 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Затем определяют приведенное активное сопротивление с учетом вытеснения тока в роторе

$$r'_{2\xi} = k_{np1} (r_{c\xi} + r_k) = 1,2537 \cdot 10^3 \cdot (0,0663 + 0,0107) \cdot 10^{-3} = 0,0927 \text{ Ом}$$

Так как при наличии вытеснения изменяется площадь поперечного сечения, занимаемая током, то изменяется и магнитная проводимость пазового рассеяния

$$\lambda_{n2\xi} = \left[ \frac{h_1 + 0,8r_2}{6 \cdot r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_1^2}{2q_{cm}} \right)^2 + 0,66 - \frac{\sigma_{u2}}{4r_1} \right] \cdot \psi + 0,3 + 1,12 \cdot \frac{h_2 \cdot 10^3}{I_2} =$$

$$i \left[ \frac{36 + 0,8 \cdot 1,69}{6 \cdot 4,8} \left( 1 - \frac{\pi \cdot 4,8^2}{2 \cdot 274,1} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 4,8} \right] \cdot 0,5 + 0,3 + 1,12 \frac{0,3 \cdot 10^3}{625,7} = 1,606$$

где:  $\Psi = 0,5$  - коэффициент, учитывающий уменьшение проводимости пазового рассеяния при вытеснении тока, определяемый по (1, рис.21).

Коэффициент проводимости рассеяния обмотки ротора:

$$\sum \lambda_{2\xi} = \lambda_{n2\xi} + \lambda_{o2} + \lambda_{n2} + \lambda_{ck} = 1,606 + 2,068 + 0,413 + 1,559 = 5,646$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом вытеснения тока

$$x_{2\xi} = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_2 \sum \lambda_{2\xi} \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 170 \cdot 5,646 \cdot 10^{-9} = 0,379 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

Приведенное индуктивное сопротивление ротора

$$x'_{2\xi} = k_{np1} \cdot x_{2\xi} = 1,2537 \cdot 10^3 \cdot 0,379 \cdot 10^{-4} = 0,47 \text{ Ом}$$

Параметры схемы замещения

$$r''_2 = r'_2 (1 + \tau_1)^2 = 0,092 \cdot (1 + 0,0229)^2 = 0,096 \text{ Ом};$$

$$x''_2 = x'_{2\xi} (1 + \tau_1)^2 = 0,47 \cdot (1 + 0,0229)^2 = 0,491 \text{ Ом};$$

$$r'_1 = r_1 = 0,11 \text{ Ом};$$

$$x'_1 = x_1 \cdot (1 + \tau_1) = 0,311 \cdot (1 + 0,0229) = 0,3254 \text{ Ом}.$$

Приведенное активное сопротивление короткого замыкания

$$r'_k = r'_1 + r''_2 = 0,11 + 0,096 = 0,206 \text{ Ом}$$

Приведенное индуктивное сопротивление короткого замыкания

$$x'_k = x'_1 + x''_2 = 0,3254 + 0,491 = 0,8164 \text{ Ом}$$

Приведенное полное сопротивление короткого замыкания

$$z'_k = \sqrt{(r'_k)^2 + (x'_k)^2} = \sqrt{(0,206)^2 + (0,8164)^2} = 0,842 \text{ Ом}$$

При пуске двигателя начальный пусковой ток превышает номинальный в 4...7 раз, поэтому поток рассеяния статора и ротора увеличивается и возникает насыщение путей от потоков пазового рассеяния, вызывающее существенное уменьшение индуктивных сопротивлений статора и ротора.

Для учета насыщения путей от потоков рассеяния магнитные проводимости статора и ротора подразделяются на две группы. К первой группе относятся проводимости, зависящие от насыщения, т.е. переменные: составляющие проводимости рассеяния клиновой части и шлица пазов статора и ротора, мостиков закрытых пазов ротора, проводимости дифференциального рассеяния статора и ротора.

Ко второй группе относятся проводимости, не зависящие от насыщения, т.е. постоянные: проводимости рассеяния пазов статора и ротора за вычетом клиновой части шлица, мостиков закрытых пазов, проводимости лобовых частей и скоса пазов.

Составляющие, зависящие от насыщения, т.е. переменные:

а) пазовой проводимости рассеяния статора

$$\lambda_{n1\sim} = \left( \frac{3h_k}{b_2 + 2b_{u1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \right) k'_\beta = \left( \frac{3 \cdot 2,7}{9,09 + 2 \cdot 3,7} + \frac{1}{3,7} \right) \cdot 0,87 = 0,661$$

где  $k'_\beta$ - коэффициент, определяемый по (1, рис. 20);

б) пазовой проводимости рассеяния ротора

$$\lambda_{n2\sim} = 0,3 + 1,12 \frac{h_2 \cdot 10^6}{I_2} = 0,837$$

- для грушевидного закрытого паза;

в) составляющая коэффициента проводимости рассеяния статора, зависящая от насыщения

$$\sum \lambda_{1\sim} = \lambda_{n1\sim} + \lambda_{\sigma 1} = 0,661 + 1,102 = 1,763$$

г) составляющая коэффициента проводимости рассеяния ротора, зависящая от насыщения

$$\sum \lambda_{2\sim} = \lambda_{n2} + \lambda_{\sigma 2} = 0,837 + 2,068 = 2,905$$

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, зависящее от насыщения:

$$x_{\sim} = x'_1 \frac{\sum \lambda_{1\sim}}{\sum \lambda_1} + x''_2 \frac{\sum \lambda_{2\sim}}{\sum \lambda_2} = 0,3254 \cdot \frac{1,763}{4,021} + 0,491 \cdot \frac{2,905}{6,031} = 0,378 \text{ Ом}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния двигателя, не зависящее от насыщения

$$x_{=} = x'_1 \frac{\sum \lambda_1 - \sum \lambda_{1\sim}}{\sum \lambda_1} + x''_2 \frac{\sum \lambda_2 - \sum \lambda_{2\sim}}{\sum \lambda_2} =$$
$$0,3254 \cdot \frac{4,021 - 1,763}{4,021} + 0,491 \cdot \frac{6,031 - 2,905}{6,031} = 0,436 \text{ Ом}$$

Расчетный ток ротора при пуске с учетом вытеснения тока в обмотке ротора и насыщения от полей рассеяния

$$I_{2n}'' = \frac{U_1}{\sqrt{r_{k\zeta}^2 + (x_{\pm} + 0,25x_{\sim})^2}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 x_{\sim} (x_{\pm} + 0,25x_{\sim})}{N_{n1} [r_{k\zeta}^2 + (x_{\pm} + 0,25x_{\sim})^2]} =$$

$$\frac{220}{\sqrt{0,206^2 + (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)^2}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 0,378 \cdot (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)}{17 \cdot [0,206^2 + (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)^2]} = 415 \text{ A}$$

Расчетные параметры схемы замещения при пуске с учетом вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния:

полное сопротивление:

$$Z_{k\zeta n} = \frac{U_1}{I_{n2}''} = \frac{220}{415} = 0,53 \text{ Ом}$$

индуктивное сопротивление:

$$x_{k\zeta} = \sqrt{Z_{k\zeta n}^2 - r_{k\zeta}^2} = \sqrt{0,53^2 - 0,206^2} = 0,49 \text{ Ом}$$

Активная составляющая тока статора при пуске:

$$I_{1na} = I_{0a} + I_{n2}'' \left( \frac{r_{k\zeta n}}{z_{k\zeta n}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{x_{k\zeta n}}{z_{k\zeta n}} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) =$$

$$1,41 + 415 \cdot \left( \frac{0,206}{0,53} \cdot \frac{1 - 0,00793^2}{1 + 0,00793^2} - \frac{0,49}{0,53} \cdot \frac{2 \cdot 0,00793}{1 + 0,00793^2} \right) = 104,1 \text{ A}$$

Реактивная составляющая тока статора при пуске:

$$I_{1np} = I_{0\mu} + I_{n2}'' \left( \frac{x_{k\zeta n}}{z_{k\zeta n}} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{r_{k\zeta n}}{z_{k\zeta n}} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) =$$

$$15,74 + 415 \cdot \left( \frac{0,49}{0,53} \cdot \frac{1 - 0,00793^2}{1 + 0,00793^2} - \frac{0,206}{0,53} \cdot \frac{2 \cdot 0,00793}{1 + 0,00793^2} \right) = 416,8 \text{ A}$$

Фазный ток статора при пуске:

$$I_{1n} = \sqrt{I_{1na}^2 + I_{1np}^2} = \sqrt{104,1^2 + 416,8^2} = 429,6 \text{ A}$$

$$\frac{I_{1n}}{I_{1n}} = \frac{429,6}{68,48} = 6,3$$

Кратность пускового тока:

Кратность пускового момента

$$\frac{M_n}{M_n} = \frac{m_1 (I_{n2}')^2 r_2'' (1 - s_n)}{P_2} = \frac{3 \cdot 415^2 \cdot 0,096 \cdot (1 - 0,01667)}{37000} = 1,3$$

где:  $P_2$  - полезная мощность (Вт),

$$s_n = \frac{n - n_1}{n} = \frac{1500 - 1475}{1500} = 0,01667$$

## 9. Максимальный момент

Отношение максимального момента к номинальному, т. е. перегрузочная способность двигателя, должно быть не менее регламентированного ГОСТ 19523-74. При максимальном моменте ток двигателя превышает номинальный в 2...3 раза, поэтому необходимо учитывать насыщение магнитной системы от потоков рассеяния, т.к. в противном случае значение максимального момента будет заниженным.

Вытеснением тока при  $S_{kp}$  можно пренебречь, т.к. оно сравнительно невелико. Ход расчета максимального момента примерно таков, как и при расчете пускового момента. Также разделяют проводимости рассеяния на зависящие и не зависящие от насыщения.

Индуктивное сопротивление (см. п. 131), зависящее от насыщения  
 $x_{\sim} = 0,378 \text{ Ом}$

Индуктивное сопротивление, не зависящее от насыщения

$$x_{\sim} = x_1' \frac{\sum \lambda_1 - \sum \lambda_{1\sim}}{\sum \lambda_1} + x_2' \frac{\sum \lambda_2 - \sum \lambda_{2\sim}}{\sum \lambda_2} = 0,3254 \cdot \frac{4,021 - 1,763}{4,021} + 0,491 \cdot \frac{6,031 - 2,905}{6,031} = 0,436 \text{ Ом}$$

Расчетный ток ротора при  $M = M_{\max}$  с учетом насыщения

$$I_{\sim 2}'' = \frac{U_1}{\sqrt{2 \cdot \left[ (r_1')^2 + (x_{\sim} + 0,0825 x_{\sim}')^2 + r_1' (x_{\sim} + 0,0825 x_{\sim}') \right]}} = \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot \delta \cdot a_1 \cdot [r_1' + 2(x_{\sim} + 0,0825 x_{\sim}') \cdot x_{\sim}]}{2 \cdot N_{n1} \cdot \left[ (r_1')^2 + (x_{\sim} + 0,0825 x_{\sim}')^2 + r_1' (x_{\sim} + 0,0825 x_{\sim}') \right]} = \frac{220}{\sqrt{2 \cdot [0,11^2 + (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)^2 + 0,11 \cdot (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)]}} + \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot [0,11 + 2 \cdot (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)] \cdot 0,378}{2 \cdot 17 \cdot [0,11^2 + (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)^2 + 0,11 \cdot (0,436 + 0,25 \cdot 0,378)]} = 212,6 \text{ А}$$

Сопротивление схемы замещения при максимальном моменте

$$Z_m = \frac{U_1}{I_{M2}''} = \frac{220}{212,6} = 1,035 \text{ Ом};$$

$$Z_\infty = \frac{\sqrt{(r_1')^2 + 2 \cdot Z_m^2 - (r_1')^2}}{2} = \frac{\sqrt{0,11^2 + 2 \cdot 1,035^2 - 0,11^2}}{2} = 0,728 \text{ Ом};$$

$$X_k = \sqrt{Z_\infty^2 - (r_1')^2} = \sqrt{0,728^2 - 0,11^2} = 0,72 \text{ Ом};$$

$$R_m = Z_\infty + r_1' = 0,728 + 0,11 = 0,838 \text{ Ом}.$$

### Активная составляющая тока статора

$$I_{Ma1} = I_{oa} + I_{M2}'' \left( \frac{R_m}{Z_m} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{X_k}{Z_m} \cdot \frac{2 \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) =$$

$$\approx 1,41 + 212,6 \cdot \left( \frac{0,838}{1,035} \cdot \frac{1 - 0,00793^2}{1 + 0,00793^2} - \frac{0,72}{1,035} \cdot \frac{2 \cdot 0,00793}{1 + 0,00793^2} \right) = 160,3 \text{ A}$$

### Реактивная составляющая тока статора

$$I_{Mp1} = I_{oa} + I_{M2}'' \left( \frac{X_k}{Z_m} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 - \rho_1^2} - \frac{R_m}{Z_m} \cdot \frac{2 \rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) =$$

$$\approx 15,74 + 212,6 \cdot \left( \frac{0,72}{1,035} \cdot \frac{1 - 0,00793^2}{1 + 0,00793^2} - \frac{0,838}{1,035} \cdot \frac{2 \cdot 0,00793}{1 + 0,00793^2} \right) = 166,6 \text{ A}$$

### Ток фазы статора при $M = M_{\max}$

$$I_{M1} = \sqrt{I_{Ma1}^2 + I_{Mp1}^2} = \sqrt{160,3^2 + 166,6^2} = 231,2 \text{ A}$$

### Кратность максимального момента

$$\frac{M_{\max}}{M_{ном}} = \frac{m \cdot U_1^2 (1 - s_H)}{2 \cdot R_m \cdot P_2} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,01667)}{2 \cdot 0,838 \cdot 37000} = 2,4$$

### Критическое скольжение

$$s_{kp} = \frac{r_2''}{r_\infty} = \frac{0,096}{0,728} = 0,132$$

## 10. Тепловой расчет

При работе двигателя в нем возникают потери, которые выделяются в виде тепла и отводятся охлаждающим воздухом. Тепло, выделяющееся в машине, вызывает повышение температуры отдельных ее частей. Наиболее чувствительной к нагреву является изоляция обмоток машины. Повышение температуры обмотки на  $10-12^{\circ}\text{C}$  выше допустимой сокращает срок службы изоляции вдвое. Поэтому очень важно правильно выбрать тепловой расчет машины.

На нагревание электрической машины влияет режим работы машины и температура охлаждающей среды. Поэтому вводится понятие перегрева  $\theta$  или превышение температуры различных частей машины  $\tau$  над температурой окружающей среды  $\tau_{охл}$ , т.е.  $\theta = \tau - \tau_{охл}$

Допустимый нагрев обмоток зависит от класса изоляции машины (при температуре охлаждающего воздуха  $+ 400\text{ C}$ ).

На стадии проектирования электрической машины расчётным путём определяют превышение температуры отдельных наиболее важных частей машины, и тем самым контролируют правильность выбранных электромагнитных нагрузок.

Тепловой расчёт машины может быть установившимся и неустойчивым. Для электрических машин общепромышленного применения, предназначенных для длительного режима работы, обычно производят расчет установившегося теплового режима. При расчёте нагрева для упрощения машину считают как однородное тело. В этом случае передача тепла в окружающую среду происходит путём теплопроводности и теплорассеяния с охлаждаемых поверхностей, а температура изменяется по экспоненциальному закону:

$$\theta = \theta_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) \text{ - при нагреве;}$$

$$\theta = \theta_{\infty} e^{-\frac{t}{T}} \text{ - при охлаждении машины;}$$

$\theta$  - установившийся нагрев;- постоянная времени нагревания, т.е. время, в течение которого машина нагреется до установившейся температуры, если не будет передачи тепла в окружающую среду.

При передаче тепла от источника тепла к окружающей среде происходит перепад температуры в активных частях машины, в толщине изоляции и между охлаждающими поверхностями и окружающей средой. Так как теплопроводность стали сердечника велика, то перепадом температуры в толще металла, обмотки и сердечника пренебрегают. Обычно

ограничиваются определением среднего перегрева обмоток, т.е. считают, что температура обмоток в стали сердечника во всём объёме постоянна. В этом случае тепловой расчёт сводится к определению перепада температуры в пазовой изоляции и превышений температуры внешней поверхности статора и лобовых частей над температурой охлаждающего воздуха.

Температурный перепад по толщине изоляции

Проводники обмоток асинхронных двигателей имеют эмалевую изоляцию, а секции изолируются друг от друга и от паза, поэтому слой изоляции оказывается достаточно толстым. Теплопроводность изоляции весьма низка и не является одинаковой по толщине изоляции. Особенно отрицательную роль в тепловом режиме машины играют воздушные прослойки в пазовой изоляции, т.к. теплопроводность воздуха еще хуже, чем изоляции. Поэтому обмотки электрических машин, как правило, пропитывают компаундами в специальных вакуум-аппаратах, чтобы вытеснить воздух из изоляции и улучшить её теплопроводность. Для практических тепловых расчетов применяют на основании опытных данных значение эквивалентной удельной теплопроводности  $\lambda_{эkv}$ , равное  $16 \cdot 10^{-3}$  Вт/град·мм для изоляции класса F (компаундированной).

Температурный перепад в пазовой изоляции определяется по формуле

$$\Delta\theta_u = \frac{\kappa_\theta P_{m1} \frac{2l_1}{l_{cp1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1} \left( \frac{b_{u1}}{\lambda_{эKB}} + \frac{b_{n1} + b_{n2}}{16\lambda_{эKB}} \right);$$

где:  $\kappa_\theta$  - коэффициент для приведения потерь в меди при расчетной температуре к максимально допустимой температуре. При изоляции класса F

$$k_\theta = \frac{r_{115}}{r_{140}} = 1,07$$

$\Pi_1$  - периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения паза

статора, мм; для трапециевидальных полузакрытых пазов

$$\Pi_1 = 2h_{n1} + b_{n1} + b_{n2} = 2 \cdot 28,5 + 12,3 + 9,09 = 78,4 \text{ мм.}$$

$b_{u1}$  - односторонняя толщина изоляции в пазу статора, мм, принимаемая по (1, табл. 14).

$\lambda'_{эKB}$  - эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушки из круглого провода, определяемый по (1, рис. 24).

$$\lambda'_{эKB} = 13 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(мм} \cdot \text{0C)}.$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta\theta_{u1} = \frac{k_\theta \cdot P_{m1} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_1} \cdot \left( \frac{b_{u1}}{\lambda_{эKB}} + \frac{b_{n1} + b_{n2}}{16 \{ \lambda'_{эKB} \}} \cdot i \right) =$$

$$i \frac{1,07 \cdot 513 \cdot \frac{2 \cdot 170}{862}}{48 \cdot 78,4 \cdot 170} \cdot \left( \frac{0,4}{16 \cdot 10^{-5}} + \frac{12,3 + 9,09}{16 \cdot 13 \cdot 10^{-4}} \right) = 1,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta\theta_{n1} = \frac{k \cdot \left( k_{\theta} P_{.m1} \frac{2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + \sum P_c \right)}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1}, \text{ } ^\circ C$$

где:  $\alpha_1$  - коэффициент теплопроводности с поверхности сердечника статора, Вт/мм<sup>2</sup> 0С, выбирается по (1, рис.25);  $\alpha_1 = 11,5 \cdot 10^{-5}$  Вт/мм<sup>2</sup> 0С.

$k$  - коэффициент, учитывающий долю потерь в сердечнике статора, передаваемых воздуху двигателя, определяемый по (1, табл.24).  $k = 0,2$

$$\Delta\theta_{n1} = \frac{k \cdot \left( k_{\theta} P_{.m1} \frac{2l_1}{l_{cp1}} + \sum P_c \right)}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot \left( 1,07 \cdot 513 \cdot \frac{2 \cdot 170}{862} + 582,8 \right)}{\pi \cdot 233 \cdot 170 \cdot 11,5 \cdot 10^{-5}} = 11,2 \text{ } ^\circ C$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\theta_{n1} = \frac{k \cdot k_0 \cdot P_{.m1} \cdot \frac{2l_{.n1}}{l_{cp1}}}{2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{.n1} \cdot \alpha_1} = \frac{0,2 \cdot 1,07 \cdot 513 \cdot \frac{2 \cdot 261,24}{862}}{2 \cdot \pi \cdot 233 \cdot 81,82 \cdot 11,5 \cdot 10^{-5}} = 4,83 \text{ } ^\circ C$$

Перепад температуры в изоляции лобовой части обмотки статора:

$$\Delta\theta_{.n1} = \frac{k_{\theta} \cdot P_{.m1} \cdot \frac{2l_{.n1}}{l_{cp1}} \cdot h_{n1}}{24 \cdot Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{.n1} \cdot \lambda'_{.экс}} = \frac{1,07 \cdot 513 \cdot \frac{2 \cdot 261,24}{862} \cdot 28,5}{24 \cdot 48 \cdot 78,4 \cdot 261,24 \cdot 13 \cdot 10^{-4}} = 0,31 \text{ } ^\circ C$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой внутри двигателя

$$\Delta\theta'_1 = \left( \Delta\theta_{n1} + \Delta\theta_{.n1} \right) \frac{2l_1}{l_{cp}} + \left( \theta_{n1} + \Delta\theta_{.n1} \right) \frac{2l_{.n1}}{l_{cp}} =$$

$$i \left( 11,2 + 1,2 \right) \cdot \frac{2 \cdot 170}{862} + \left( 4,83 + 0,31 \right) \cdot \frac{2 \cdot 261,24}{862} = 7,88 \text{ } ^\circ C$$

Среднее превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающей среды:

$$\Delta\theta_{\epsilon} = \frac{\sum P'}{S_{\text{дв}} \alpha_{\epsilon}}, \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

где:  $\sum P'$  - сумма всех потерь двигателя при предельной допустимой температуре за исключением: доли потерь в статоре, передаваемых через наружную поверхность сердечника, а для двигателей со степенью защиты IP44 исключают еще мощность, потребляемую наружным вентилятором, которую принимают примерно равной  $0,9 \sum P_{\text{мх}}$ ;

$$\begin{aligned} \sum P' &= k \cdot k_{\theta} \cdot P_{\text{м1}} \cdot \frac{2l_1}{l_{\text{сп1}}} + 1,15 P_{\text{м1}} \cdot \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп}}} + k \sum P_{\text{с1}} + 0,1 \sum P_{\text{мх}} + P_{\text{двб}} + 1,056 P_{\text{м2}} = \\ &= 0,2 \cdot 1,07 \cdot 513 \cdot \frac{2 \cdot 170}{862} + 1,15 \cdot 513 \cdot \frac{2 \cdot 261,24}{862} + 0,2 \cdot 582,8 + 0,1 \cdot 322 + 199 + 1,056 \cdot 544 = 1323,1 \text{ Вт} \end{aligned}$$

$S_{\text{дв}}$  - условная поверхность охлаждения двигателя, мм<sup>2</sup>; для двигателей со степенью защиты IP44:

$$S_{\text{дв}} = (\pi D_{\text{н1}} + 8 \cdot n_p \cdot h_p) \cdot (l_1 - 2l_{\text{с1}}) = (\pi \cdot 349 + 8 \cdot 388) \cdot (170 + 2 \cdot 81,82) = 1,4 \cdot 10^6 \text{ мм}^2$$

где:  $n_p \cdot h_p$  - число и высота ребер по (1, рис.26).  $n_p \cdot h_p = 388$   
 $\alpha_{\epsilon} = 2,8$  - коэффициент подогрева воздуха, Вт/мм<sup>2</sup> 0С по (1, рис.27).

$$\Delta\theta_{\epsilon} = \frac{\sum P'}{S_{\text{дв}} \cdot \alpha_{\epsilon}} = \frac{1323,1}{1,4 \cdot 10^6 \cdot 2,8 \cdot 10^{-5}} = 33,75 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающей среды

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta'_1 + \Delta\theta_g = 7,88 + 33,75 = 41,63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Полученный перегрев меньше допустимого для изоляции класса F.

## Заключение

В данном курсовом проекте был спроектирован асинхронный электродвигатель серии 4А основного исполнения, с высотой оси вращения  $h=200$  мм, степенью защиты IP44, с короткозамкнутым ротором, среднего установочного размера по длине станины, четырехполюсный, климатического исполнения У, категории размещения 3 (4А200М4У3).

Спроектированный асинхронный электродвигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ как по энергетическим показателям (КПД и  $\cos\phi$ ), так и по пусковым характеристикам.

## Список литературы

Методические указания к курсовому проекту «Проектирование асинхронного электродвигателя».

Проектирование электрических машин. Под ред. И.П. Копылова. М.: «Энергия», 1980.

Обмоточные данные асинхронных двигателей. Под ред. П.И.Цибулевского. М.: «Энергия», 1971.