

## **Ведение**

Наиболее широко применяемыми электрическими машинами являются асинхронные двигатели. Только низковольтные двигатели потребляют более 40% всей электрической энергии, вырабатываемой в России. Потребность в электродвигателях постоянно растет.

Почти за 100 лет существования асинхронных двигателей в них совершенствовались применяемые материалы, конструкция отдельных узлов и деталей, технология их изготовления, однако принципиальные конструкторские решения в основном остались неизменными.

В данной выпускной квалификационной работе проектируется асинхронный электродвигатель для системы вентиляции.

В специальной части проводится замена материала обмотки ротора с целью повышения энергетических показателей электродвигателя, при этом статор сохраняет все основные параметры.

В технологической части работы разрабатывается процесс общей сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором при серийном производстве. При этом рассматриваются такие вопросы как: анализ конструкции электрической машины на технологичность, размерный анализ методом полной взаимозаменяемости, составление схемы сборки и маршрутная технология, выбор оборудования и приспособления для сборки асинхронных двигателей, определение норм времени на операции и оборудование, построение графика загрузки оборудования.

В экономической части работы производится расчёт затрат на проектирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, оценка его конкурентоспособности.

Также рассматриваются вопросы социальной ответственности при осуществлении общей сборки двигателей. В данном разделе описаны вопросы безопасности и экологичности технологического процесса сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

# 1. Электромагнитный расчет

## 1.1. Выбор главных размеров

### Исходные данные

Номинальная мощность  $P_2=45000$  Вт;

Номинальное напряжение  $U=220$  В;

Номинальная частота  $f_1=50$  Гц;

Число фаз  $m=3$ ;

Число пар полюсов  $p=2$ ;

Высота оси вращения  $h=200$  мм;

Степень защиты IP44;

Система охлаждения IC0141;

Способ монтажа IM1001;

К главным размерам машины относят внутренний диаметр магнитопровода статора  $D_a$  и расчетная длина воздушного зазора  $l_\delta$ .

Выбираем наружный диаметр магнитопровода статора [1, с.344, табл. 9.9], при  $h=200$  мм выбираем:

$$D_a = 0.350 \text{ м}$$

Внутренний диаметр магнитопровода статора [1, формула 9.2]:

$$D = k_d \cdot D_a = 0.67 \cdot 0.35 = 0.238 \text{ м}$$

где  $k_d$  – коэффициент, характеризующий отношение внутреннего и наружного диаметра сердечника статора. Согласно рекомендациям [1, таблица 9.9] при  $2p=4$  выбираем  $k_d = 0.67$ .

Полюсное деление  $\tau$  найдем из [1, формула 9.3]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0.238}{2 \cdot 2} = 0.187 \text{ м.}$$

Расчетная мощность  $P'$  [1, формула 9.4]:

$$P' = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{45000 \cdot 0.978}{0.915 \cdot 0.9} = 53443 \text{ Вт.}$$

где  $k_E$  – коэффициент ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, принимаем  $k_E = 0.978$  [1, рисунок 9.20].

$\eta$  – коэффициент полезного действия (КПД), принимаем  $\eta = 0.915$  при  $P_2=45$  кВт и  $2p=4$  [1, рисунок 9.21 б].

Электромагнитные нагрузки – линейная нагрузка  $A$  и индукция в воздушном зазоре  $B_\delta$  – сильно влияют на размеры двигателя. Предварительный выбор электромагнитных нагрузок: [1, рисунок 9.22 б] исходя из  $D_a=0.35$  м выбираем:

$$B_\delta=0.765 \text{ Тл}; \quad A=36 \cdot 10^3 \text{ А/м};$$

Выбираем обмоточный коэффициент  $k_{об1}=0.92$ . принимаем предварительно для двухслойной обмотки.

Рассчитаем синхронную угловую частоту вала двигателя по [1, формула 9.5]:

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1500}{60} = 157.08 \text{ рад/с.}$$

Коэффициент формы поля подсчитаем

$$K_b = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1.11.$$

Рассчитаем длину воздушного зазора по [1, формула 9.6]:

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \cdot \Omega \cdot K_b \cdot K_{об1} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{53443}{0.238^2 \cdot 157.08 \cdot 1.11 \cdot 0.92 \cdot 36 \cdot 10^3 \cdot 0.765} = 0.213 \text{ м.}$$

Рассчитанная длина сердечника не превышает 250...300 мм, тогда радиальные вентиляционные каналы не делаем. По этому длина сердечника статора:  $l_{ст1} = l_\delta = 0.213$  м

Произведём проверку:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0.213}{0.187} = 1.14$$

Полученное значение  $\lambda$  входит в область рекомендуемых пределов (0.6 - 1.25), показанных на [1, рисунок 9.25 а]. Следовательно, главные размеры двигателя выбраны правильно. Окончательно примем:  $D_a=0.35$  м;  $D=0.238$  м; длина сердечника статора  $l_1=l_\delta=0.213$  м.

## 1.2. Расчет обмоток статора

При расчёте обмотки статора определяется числа пазов  $Z_1$ , числа витков  $w_1$  в фазе обмотки и сечение проводника статора.

Выбираем предельные значения зубцового деления  $t_{z1}$  [1, рисунок 9.26] при  $\tau=0.187$  м:

$$t_{z1\max}=0.0162\text{м.} \quad t_{z1\min}=0.0133\text{м.}$$

тогда возможное число пазов статора  $Z_1$  найдем по [1, формула 9.16]:

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1\max}} = \frac{\pi \cdot 0.238}{0.0162} = 46.15; \quad Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1\min}} = \frac{\pi \cdot 0.238}{0.0133} = 56.22;$$

Выберем окончательно число пазов статора  $Z_1=48$ . Число пазов статора выберем кратно числу фаз (В асинхронный двигателях должно быть кратно), и число пазов на полюс и фазу  $q$  целым.

Проверим число пазов на полюс и фазу  $q$ :

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 4.$$

Окончательное значение зубцового деления статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0.238}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 0.016 \text{ м.}$$

Определённое значение  $t_{z1}$  принадлежит ранее заданному интервалу ( $13.3 \cdot 10^{-3} \div 16.2 \cdot 10^{-3}$  м).

Подсчитаем номинальный ток обмотки статора [1, формула 9.18]:

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m_1 \cdot U \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{45000}{3 \cdot 220 \cdot 0.915 \cdot 0.9} = 82.795 \text{ А.}$$

Предварительное число эффективных проводников в пазу [1, формула 9.17]:

$$u'_{\pi} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1н\text{ном}} \cdot Z_1} = \frac{\pi \cdot 0.238 \cdot 36 \cdot 10^3}{82.79 \cdot 48} = 6.77.$$

Число параллельных ветвей примем:  $a = 2$ ;

Окончательное значение числа проводников [1, формула 9.19]:

$$u_{\pi} = a \cdot u'_{\pi} = 2 \cdot 6.77 = 13.55; \quad \text{тогда } u_{\pi}=14.$$

Окончательное число витков в фазе обмотки [1, формула 9.20]:

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{14 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 56.$$

Окончательное значение линейной нагрузки [1, формула 9.21]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1\text{ном}} \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 82.79 \cdot 56 \cdot 3}{\pi \cdot 0.238} = 37.2 \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}}.$$

Рассчитаем значение магнитного потока [1, формула 9.22]:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U}{4 \cdot k_b \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot f_1} = \frac{0.978 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 56 \cdot 0.92 \cdot 50} = 0.0188 \text{ Вб}.$$

Определим значение индукции в воздушном зазоре [1, формула 9.23]:

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = \frac{2 \cdot 0.0188}{0.238 \cdot 0.213} = 0.742 \text{ Тл}.$$

Значения  $A$  и  $B_\delta$  находятся в допустимых пределах (менее  $\pm 5$ , что является допустимым) [1, рисунок 9.22 б].

Определим допустимую плотность тока в обмотке статора, с учетом линейной нагрузки двигателя [1, формула 9.25]:

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{185 \cdot 10^9}{37.2 \cdot 10^3} = 4.97 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$$

где  $AJ$  – произведение линейной нагрузки на плотность тока [1, рисунок 9.27 б] при  $D_a=0.35$  м;  $AJ=(183 - 188) \cdot 10^9 \text{А}^2/\text{м}^3$ .

Предварительно сечение эффективного проводника [1, формула 9.24]:

$$q_{эф1} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot J_1} = \frac{82.79}{2 \cdot 4.97 \cdot 10^6} = 8.324 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Выбираем (окончательное) сечение эффективного проводника: принимаем  $n_{эл}=4$ , тогда

$$q_{эл} = \frac{q_{эф1}}{n_{эл}} = \frac{8.324 \cdot 10^{-6}}{4} = 2.081 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

По [1, Приложение 3.1] находим диаметр изолированного  $d_{из}=1.685$  мм и неизолированного  $d_{эл}=1.6$  мм провода. Выбираем круглый медный провод марки ПЭТ-155,  $q_{эл}=2.011 \text{ мм}^2$ ;  $q_{эф}=q_{эл} \cdot n_{эл}=2.011 \cdot 4=8.044 \text{ мм}^2$ .

Уточним (окончательное) плотность тока в обмотке статора [1, формула 9.27]:

$$J_1 = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = \frac{82.79}{2 \cdot (2.011 \cdot 10^{-6}) \cdot 4} = 5.146 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

### 1.3. Расчет размеров зубцовой зоны статора

Площадь паза должна с учетом всей изоляции соответствовать количеству размещаемых в пазу проводников обмотки. Значение индукции в зубцах должно находиться в определенных пределах, также индукция ярме статора должна находиться в определенных пределах. Выбираем электротехническую сталь марки 2013, коэффициент заполнения сердечников статора и ротора  $k_c=0,97$  [1, таблица 9.13].

Выбираем трапецеидальный паз статора [1, рисунок 9.29 а] с соотношением размеров обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов.

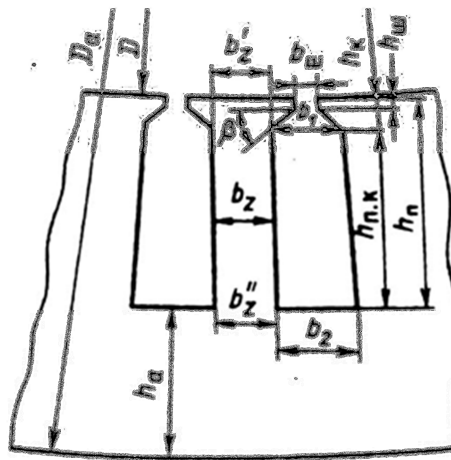


Рисунок 1.1 Трапецеидальный паз статора

По [1, таблица 9.12] предварительно для  $2p=4$  выбираем допустимые значения индукции: ярмо статора  $B_a=1.6$  Тл. Зубцы статора при постоянном сечении:  $B_{z1}=1.9$  Тл.

Определим ширину зубцов статора [1, формула 9.30]:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{\text{ст1}} \cdot k_{c1}} = \frac{0.742 \cdot 0.016 \cdot 0.213}{1.9 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 6.3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Определим высоту ярма статора [1, формула 9.28]:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_\delta \cdot k_{c1}} = \frac{0.0188}{2 \cdot 1.6 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 0.0284 \text{ м.}$$

Размер паза в штампе принимаем [1, формулы 9.38, 9.40, 9.39]:

Ширина шлица паза выбираем из [1, таблица 9.16]:  $b_{ш}=3.7$  мм;

высота шлица  $h_{ш}=1$  мм;

Найдем размеры паза в штампе:

$$h_{п} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0.35 - 0.238}{2} - 0.0284 = 0.0276 \text{ м.}$$

Ширина паза статора: Большой диаметр [1, формула 9.39]:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{п})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0.238 + 2 \cdot 0.0276)}{48} - 6.3 \cdot 10^{-3} = 12.9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Меньший диаметр [1, формула 9.40]:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{ш} - b_{ш}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} =$$

$$= \frac{\pi \cdot (0.238 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 3.7 \cdot 10^{-3}) - 48 \cdot 6.3 \cdot 10^{-3}}{48 - \pi} = 9.8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Клиновую часть паза найдём из выражения [1, формулы 9.42-45]:

$$h_{п.к} = h_{п} - \left( h_{ш} + \frac{b_1 - b_{ш}}{2} \right) = 0.0276 - \left( 0.001 + \frac{9.8 \cdot 10^{-3} - 0.0037}{2} \right) =$$

$$= 0.0235 \text{ м.}$$

Размеры паза "в свету" с учетом припуска на шихтовку сердечников [1, формула 9.42]:

$$\Delta b_{п} = 0.2 \text{ мм; } \Delta h_{п} = 0.2 \text{ мм;}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_{п} = 12.9 - 0.2 = 12.7 \text{ мм;}$$

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_{п} = 9.8 - 0.2 = 9.6 \text{ мм;}$$

$$h'_{п.к} = h_{п.к} - \Delta h_{п} = 23.5 - 0.2 = 23.3 \text{ мм.}$$

Одностороннюю толщину изоляции в пазу найдем по [1, таблица 3.1]:

$$b_{из}=0.4 \text{ мм.}$$

Площадь, которая занимается прокладками в пазу [1, формула 9.47]

$$S_{пр} = (0.9 \cdot b_1 + 0.4 \cdot b_2) \cdot 10^{-3} = (0.9 \cdot 12.9 + 0.4 \cdot 9.6) \cdot 10^{-3} = 1.4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Площадь, которая занимает корпусной изоляции в пазу [1, формула 9.46]:

$$S_{\text{из}} = b_{\text{из}} \cdot (2 \cdot h_{\text{п}} + b_1 + b_2) = 0.4 \cdot (2 \cdot 27.6 + 9.8 + 12.9) = 31.16 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения паза, которая (оставшаяся свободно) для размещения проводников в обмотке [1, формула 9.48]:

$$\begin{aligned} S'_{\text{п}} &= \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{\text{п.к}} - (S_{\text{из}} + S_{\text{пр}}) = \frac{9.6 + 12.7}{2} \cdot 23.3 - (31.16 + 14) \\ &= 215.2 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Подсчитаем коэффициент заполнения паза [1, формула 3.2]:

$$k_3 = \frac{d_{\text{из}}^2 \cdot n_{\text{эл}} \cdot u_{\text{п}}}{S'_{\text{п}}} = \frac{1.685^2 \cdot 4 \cdot 14}{215.2} = 0.74.$$

Коэффициент заполнения паза входит в область допустимых пределов  $k_3=0.72\dots 0.74$  для механизированной укладки обмотки двигателей  $2p \geq 4$ .

#### 1.4. Расчет ротора

Энергетические показатели асинхронного двигателя во много зависят правильному выбору воздушного зазора  $\delta$ . Когда воздушный зазор уменьшится, то может приводить к уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, поэтому возрастает  $\cos\varphi$  (коэффициент мощности) двигателя, и потери в меди отмотки статора уменьшаются. Однако чрезмерное уменьшение воздушного зазора приводит к возрастанию амплитуд пульсаций индукции в  $\delta$ , при этом увеличиваются поверхностные и пульсационные потери. С очень маленьким воздушным зазором КПД двигателей не улучшается, а часто становится меньше.

Величину воздушного зазора выберем из [1, рисунок 9.31] для  $2p=4$  и  $D=0.238$  м:  $\delta=0.7$  мм.

Выбор число пазов ротора обосновывается наилучшие сочетания  $Z_1$  и  $Z_2$ , которые рекомендованы в таблицу 9.18 [1, сс.373-374].

Выбираем число пазов ротора  $Z_2=56$ ;



Диаметр ротора (внешний):  $D_2 = D - 2 \cdot \delta = 238 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} = 236.6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$

Принимаем длина магнитопровода ротора:  $l_2 = l_1 = 0.213 \text{ м};$

Зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0.2366}{56} = 0.013 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр сердечника ротора равен диаметру вала [1, формула 9.102]:

$$D_B = k_B \cdot D_a = 0.23 \cdot 0.35 = 0.08 \text{ м};$$

(по [1, таблица 9.19] для  $h=71-225 \text{ мм}$  и  $2p=2-8$ :  $k_B=0.23$ ).

Принимаем  $D_j = D_B = 0.08 \text{ м.}$

Ток в стержне обмотки ротора [1, формула 9.57]:

Коэффициент учитывающий влияние тока намагничивания [1, формула 9.58]:

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.9 = 0.92.$$

Коэффициент приведения токов с кз роторами [1, формула 9.66]:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 56 \cdot 0.92}{56} = 5.52;$$

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 0.92 \cdot 82.79 \cdot 5.52 = 420.5 \text{ А.}$$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) [1, формула 9.68 ]:

плотность тока в стержне литой клетки принимаем  $J_2=2.8 \cdot 10^6$ ;

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{420.5}{2.8 \cdot 10^6} = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Выбираем пазы ротора грушевидной формы. В асинхронных двигателях обычно выполняют мощностью до 50 - 60 кВт грушевидные пазы и литую обмотку из алюминия. Размеры паза выбираются такими, чтобы зубцы ротора обеспечивали параллельные грани.

Размеры шлица [1, рис.9.40,б]:  $b_{ш2} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$

Высота шлица:  $h_{ш2} = 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ м};$

Толщина ферромагнитного мостика  $h'_{ш2} = 0.3 \cdot 10^{-3}$  м;

Коэффициент заполнения сталью  $k_c=0.97$ ;

Допустимая ширина зубца [1, формула 9.75]:

Выбираем допустимую индукцию для зубцов ротора [1, таблица 9.12]:

$B_{z2} = 1.8$  Тл;  $l_{ст2}=l_{ст1}=0.213$  м;

$$b_{z2\text{доп}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{z2} \cdot l_{ст2} \cdot k_c} = \frac{0.742 \cdot 0.013 \cdot 0.213}{1.8 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Размеры паза рассчитаем исходя из условия постоянства ширины зубцов ротора [1, формулы 9.76-9.78]:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш2} - 2 \cdot h'_{ш2}) - Z_2 \cdot b_{z2\text{доп}}}{\pi + Z_2} =$$
$$= \frac{\pi \cdot (0.237 - 2 \cdot 0.0007 - 2 \cdot 0.0003) - 56 \cdot 5.6 \cdot 10^{-3}}{\pi + 56} = 0.0071 \text{ м;}$$
$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{0.0071^2 \cdot \left(\frac{56}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot 1.5 \cdot 10^{-4}}{\frac{56}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 0.0049 \text{ м;}$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (0.0071 - 0.0049) \cdot \frac{56}{2 \cdot \pi} = 0.0202 \text{ м.}$$

Уточняем ширину зубцов ротора [1, формулы 9.80, 9.81]

$$b_{z20} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot (h_{ш2} + h'_{ш2})}{Z_2} - b_1 =$$
$$= \pi \cdot \frac{0.237 - 2 \cdot (0.0007 + 0.0003)}{56} - 0.0071 = 0.006 \text{ м;}$$

$$b_{z21} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{п} + b_2}{Z_2} - b_2 =$$
$$= \pi \cdot \frac{0.237 - 2 \cdot 0.028 + 0.0049}{56} - 0.0049 = 0.0056 \text{ м;}$$

Полная высота паза:

$$h_{п2} = h'_{ш2} + h_{ш2} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} =$$
$$= 0.0003 + 0.0007 + \frac{0.0071}{2} + 0.014 + \frac{0.0049}{2} = 0.0272 \text{ м.}$$

Площадь сечения стержня (поперечная) [1, формула 9.79]:

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{(b_1 + b_2) \cdot h_1}{2} =$$

$$= \frac{\pi}{8} \cdot (0.0071^2 + 0.0049^2) + \frac{(0.0071 + 0.0049) \cdot 0.0202}{2} = 1.5 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

плотность тока в стержне  $J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{420.5}{1.5 \cdot 10^{-4}} = 2.8 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$

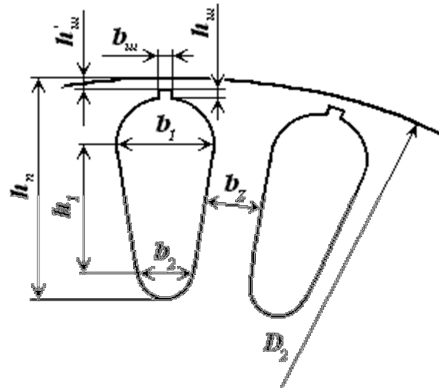


Рисунок 1.2. Паз ротора.

Кольца короткозамыкающие.

коэффициент  $\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{56}\right) = 0.224.$

Ток в короткозамыкающем кольце [ 1, формула 9.70 ]:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{420.5}{0.0224} = 1877.68 \text{ А.}$$

Плотность тока в замыкающих кольцах выбирают в среднем на 15 - 20% меньше, чем в стержнях с целью снижения общего сопротивления КЗ обмотки ротора.

$$J_{\text{кл}} = 0.85 \cdot J_2 = 2.38 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Площадь, сечения кольца (поперечная) [ 1, формула 9.72 ]:

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = \frac{1877.68}{2.38 \cdot 10^6} = 7.889 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Размеры короткозамыкающих колец:

Высота:  $h_{\text{кл}} = 1.25 \cdot h_{\text{п2}} = 1.25 \cdot 0.0272 = 0.034 \text{ м;}$

Толщина:  $b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}} = \frac{7.889 \cdot 10^{-4}}{0.034} = 0.024 \text{ м;}$

Сечение:  $q_{\text{кл}} = h_{\text{кл}} \cdot b_{\text{кл}} = 0.034 \cdot 0.023 = 7.889 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$

Среднее значение диаметра КЗ кольца:

$$D_{\text{к.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 0.237 - 0.034 = 0.203 \text{ м.}$$

### 1.5. Расчет магнитной цепи

Магнитная цепь двигателя состоит из пяти однородных участков, соединенных последовательно: зубцовый слой статора, зубцовый слой ротора, воздушный зазор, спинка статора и спинка ротора. Расчету включается определение по каждой участке размеров и площади поперечного сечения, магнитной индукции, напряженности поля, (расчетной) средней длины магнитной силовой линии, магнитного напряжения участка. Потом рассчитываем суммарная МДС участка цепи и намагничивающий ток электродвигателя.

Индукцию в зубце статора [1, формула 9.105]:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{b_{z1} \cdot k_{c1}} = \frac{0.742 \cdot 0.016}{6 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97} = 1.9 \text{ Тл.}$$

Индукцию в зубце ротора [1, формула 9.109]:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{b_{z2} \cdot k_c} = \frac{0.742 \cdot 0.013}{6 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97} = 1.8 \text{ Тл.}$$

Индукцию в ярме статора [1, формула 9.117]:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{\text{ст1}} \cdot k_c} = \frac{0.019}{2 \cdot 0.028 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 1.6 \text{ Тл.}$$

Расчетная высота спинка ротора [1, формула 9.123]:

$$h'_j = \frac{2 + p}{3.2 \cdot p} \cdot \left( \frac{D_2}{2} - h_{\text{п2}} \right) = \frac{2 + 2}{3.2 \cdot 2} \cdot \left( \frac{0.2366}{2} - 0.0272 \right) = 0.057 \text{ м.}$$

Индукцию в ярме ротора [1, формула 9.122]:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_{\text{ст2}} \cdot k_c} = \frac{0.019}{2 \cdot 0.057 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 0.799 \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора [1, формула 9.103]:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.742 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot 1.139 = 941.194 \text{ А.}$$

Магнитная пропорциональность  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м;}$

Коэффициент воздушного зазора [1, формула 4.17]:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1.139 \cdot 1 = 1.139.$$

Коэффициент воздушного зазора для статора [1, формула 4.14]:

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.016}{0.016 \cdot 2.716 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3}} = 1.139.$$

где по [1, формула 4.15]:

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш}/\delta)^2}{5 + b_{ш}/\delta} = \frac{(3.7 \cdot 10^{-3}/0.7 \cdot 10^{-3})^2}{5 + 3.7 \cdot 10^{-3}/0.7 \cdot 10^{-3}} = 2.716.$$

Коэффициент воздушного зазора для ротора [1, формула 4.14]:

при  $h'_{ш2} > 0$   $k_{\delta 2} = 1$ ;

Расчётная высота зубца статора и ротора

$$h_{z1} = h_n = 0.0276 \text{ м};$$

$$h_{z2} = h_{n2} - 0.1 \cdot b_2 = 0.027 - 0.1 \cdot 0.0056 = 0.0267 \text{ м}.$$

Напряженность зубцовой зоны статора и ротора [1, таблица П1.7]:

коэффициент, учитывающий ответвление потока в паз статора [(4.33)

С.179]:

$H_{z1} = 2070$  Тл,  $B_{z1} = 1.9 > 1.8$  Считаем коэффициент ответвления

$$k_{п1} = \frac{b_1 + b_2}{2 \cdot b_{z1} \cdot k_{с1}} = \frac{0.0098 + 0.0129}{2 \cdot 0.006 \cdot 0.97} = 1.87.$$

Принимаем:

$$B_{z1} = B_{z1} - \mu_0 \cdot H_{z1} \cdot k_{п1} = 1.9 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2070 \cdot 1.87 = 1.895 \text{ Тл}$$

$$H_{z1} = 2010 \text{ Тл} \quad \text{для} \quad B_{z1} = 1.895 \text{ Тл};$$

$$H_{z2} = 1520 \text{ Тл} \quad \text{для} \quad B_{z2} = 1.8 \text{ Тл}.$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора [1, формула 9.104]:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0.0276 \cdot 2010 = 110.81 \text{ А}.$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора [1, формула 9.108]:

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0.0267 \cdot 1520 = 81.171 \text{ А}.$$

Коэффициент насыщения в зубцовой зоны [1, формула 9.115]:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{110.81 + 81.171}{941.19} = 1.2$$

значение коэффициента насыщения зубцовой зоны удовлетворяет требованиям (1.2-1.5).

Средняя длина магнитной силовой линии в ярме статора по [1, формула 9.127]:

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.35 - 0.028)}{2 \cdot 2} = 0.2526 \text{ м.}$$

Напряженность поля в ярме статора по индукции  $B_a=1.6$  Тл находим [1, таблица П1.6]:  $H_a=750$  А/м.

Напряжение (магнитное) ярма статора [1, формула 9.116]:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.2526 \cdot 750 = 189.418 \text{ А.}$$

Высота спинки ротора [1, формула 9.126]:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{0.2366 - 0.080}{2} - 0.027 = 0.0511 \text{ м.}$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора [1, формула 9.127]:

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.080 + 0.0511)}{2 \cdot 2} = 0.103 \text{ м.}$$

Напряженность поля в ярме ротора при индукции  $B_j=0.753$ Тл находим по [1, таблица П1.6]:  $H_j=121$  А/м.

Магнитное напряжение ярма ротора [1, формула 9.121]:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.103 \cdot 121 = 12.46 \text{ А.}$$

Суммарное магнитное напряжение цепи (на пару полюсов) [1, формула 9.128]:

$$\begin{aligned} F_{ц} &= F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = \\ &= 941.194 + 110.812 + 81.171 + 189.418 + 12.46 = 1335.055 \text{ А.} \end{aligned}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя [1, формула 9.129]:

$$k_{\mu} = \frac{F_{ц}}{F_{\delta}} = \frac{1335.055}{941.194} = 1.42$$

Полученное значение  $k_{\mu}$ , соответствует рекомендованному диапазону (1.25÷1.6).

Намагничивающий ток [1, формула 9.130]:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{ц}}{0.9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{о61}} = \frac{2 \cdot 1335.055}{0.9 \cdot 3 \cdot 56 \cdot 0.92} = 19.195 \text{ А.}$$

Намагничивающий ток в процентах или долях номинального тока двигателя [1, формула 9.131]:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1\text{ном}}} = \frac{19.195}{82.79} = 0.23.$$

Относительное значение  $I_{\mu}^*$  находится в допустимых пределах (0.18 – 0.4), что свидетельствует о правильности выбора габаритов электродвигателя.

### 1.6. Параметры рабочего режима

Параметрами асинхронного двигателя называют активные и индуктивное сопротивления обмоток статора  $x_1$ ,  $r_1$ , сопротивление взаимной индуктивности  $x_{12}$ , активные и индуктивное сопротивления обмоток ротора  $r_2$ ,  $x_2$ , и расчетное сопротивление  $r_2'$ , введением которого учитывают влияние потерь в железе магнитопровода на характеристики двигателя.

#### Активные сопротивления обмоток

Активное сопротивление обмоток зависят в общем случае от длины проводников обмотки и площади поперечного сечения проводников.

Средняя ширина катушки [1, формула 9.138]:

$$b_{\text{кт}1} = \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{п}})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.238 + 0.028)}{2 \cdot 2} = 0.209 \text{ м.}$$

Вылет лобовых частей обмотки статора [1, формула 9.137]:

$$l_{\text{выл}1} = K_{\text{выл}} \cdot b_{\text{кт}1} + B = 0.4 \cdot 0.209 + 0.01 = 0.093 \text{ м.}$$

по [1, таблица 9.23] находим коэффициент;  $K_{\text{выл}}=0.4$ .

$B=0.01$  м длина вылета (прямолинейной части) лобовой части.

Длина лобовой части витка [1, формула 9.136]:

$$l_{\text{л}1} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{кт}1} + 2 \cdot B = 1.3 \cdot 0.209 + 2 \cdot 0.01 = 0.291 \text{ м}$$

где по [1, таблица 9.23] находим коэффициент:  $K_{\text{л}}=1.3$ .

Длина пазовой части:

$$l_{\text{п}1} = l_1 = 0.213 \text{ м;}$$

Длина витка обмотки (средняя) [1, формула 9.135]:

$$l_{\text{ср}1} = 2 \cdot (l_{\text{п}1} + l_{\text{л}1}) = 2 \cdot (0.213 + 0.291) = 1.008 \text{ м.}$$

Общая длина эффективных проводников фазы обмотки [1, формула 9.134]:

$$L_1 = w_1 \cdot l_{cp1} = 56 \cdot 1.008 = 56.464 \text{ м.}$$

Для обмоток статора принимаем класс нагревостойкости F с температурой 115 °C где  $\rho_{115} = 10^{-6} / 41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  - удельное сопротивление меди при температуре плюс 115 °C; тогда  $\rho_{115} = 2,439 \cdot 10^{-8}$ .

Активное сопротивление обмотки статора [1, формула 9.132]:

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 2.439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{56.464}{8.044 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0.086 \text{ Ом.}$$

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора

$$r'_1 = r_1 \cdot \frac{I_{\text{ном}}}{U} = 0.086 \cdot \frac{82.79}{220} = 0.032 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление обмотки ротора [1, формула 9.168]:

Удельная эл. сопротивление алюминия при расчётной температуре  $\rho_{2115} = 10^{-6} / 20.5 = 4.878 \cdot 10^{-8}$ .

Сопротивление стержня обмотки ротора [1, С406, формула 9.169]: , где для литой алюминиевой обмотки ротора

$$r_c = \rho_{2115} \cdot \frac{l_2}{q_c} = 4.878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.213}{1.5 \cdot 10^{-4}} = 6.919 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Сопротивление участка кольца (короткозамыкающего), заключённого между двумя соседними стержнями [1, С406, формула 9.170]:

$$r_{\text{кл}} = \rho_{2115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{к.ср}}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}}} = 4.878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0.203}{56 \cdot 7.889 \cdot 10^{-4}} = 7.028 \cdot 10^{-7} \text{ Ом.}$$

и тогда [1, С406, формула 9.168]:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 6.919 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 7.028 \cdot 10^{-7}}{0.224^2} = 9.722 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Для дальнейшего активного сопротивление  $r_2$  должно быть приведено к числу витков обмотки статора [1, формула 9.172-9.173]:

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{061})^2}{Z_2} = 9.722 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (56 \cdot 0.92)^2}{56} = 0.055.$$

Относительное значение активного сопротивления обмотки ротора



$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U} = 0.055 \cdot \frac{82.79}{220} = 0.021.$$

### Индуктивное сопротивление обмоток

Индуктивное сопротивление обмоток асинхронной машины определяется их взаимной индуктивностью и собственное индуктивностью.

Формулу для расчёта коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток статора выбираем из [1, таблица 9.26]:

$$h_2 = h'_{\text{ПК}} - 2 \cdot b_{\text{из}} = 0.023 - 2 \cdot 0.0004 = 0.0225 \text{ м};$$

$$h_k = 0.5 \cdot (b_{11} - b_{\text{ш1}}) = 0.5 \cdot (0.0129 - 0.0037) = 0.0031 \text{ м};$$

$$h_1 = 0;$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния [1, С403, таблица 9.26 ]:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{п1}} &= \frac{h_2}{3 \cdot b_{11}} \cdot k_{\beta} + \left( \frac{h_1}{b_{11}} + \frac{h_{\text{ш1}}}{b_{\text{ш1}}} + \frac{3 \cdot h_k}{b_{11} + 2 \cdot b_{\text{ш1}}} \right) \cdot k'_{\beta} = \\ &= \frac{0.0225}{3 \cdot 0.0129} \cdot 1 + \left( \frac{0}{0.0129} + \frac{0.001}{0.0037} + \frac{3 \cdot 0.0031}{0.0129 + 2 \cdot 0.0037} \right) \cdot 1 = 1.566. \end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, формула 9.159]:

$$l'_{\delta} = l_{\delta}; \quad l_l = K_l \cdot b_{\text{КТ}} + 2 \cdot B = 0.291 \text{ м}; \quad \beta = 1;$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{л1}} &= 0.34 \cdot \frac{q_1}{l'_{\delta}} \cdot (l_l - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) = \\ &= 0.34 \cdot \frac{4}{0.213} \cdot (0.291 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.187) = 1.095. \end{aligned}$$

Коэффициенты магнитной проводимости. Предварительно выбираем коэффициент  $k_{\beta} = 1$  т.к. обмотка выполнена без укорочения.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1, формула 9.160]:

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{0.016}{12 \cdot 0.0007 \cdot 1.139} \cdot 0.785 = 1.279$$

где по [1, формула 9.176]:

$$\xi = 2 \cdot k'_{\text{СК}} \cdot k_{\beta} - k_{\text{об1}}^2 \left( \frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{\text{СК}}^2) =$$

$$= 2 \cdot 0.7 \cdot 1 - 0.92^2 \cdot \left(\frac{0.013}{0.016}\right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 0.785;$$

пазы без скоса  $\beta_{\text{ск}}=0$ , и отношение

$$\frac{t_{z2}}{t_{z1}} = \frac{0.013}{0.016} = 0.852; \quad k_{\text{ск}} = 0.7;$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$\begin{aligned} x_1 &= 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_\delta}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{л1} + \lambda_{п1} + \lambda_{д1}) = \\ &= 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{56}{100}\right)^2 \cdot \frac{0.213}{2 \cdot 4} \cdot (1.095 + 1.566 + 1.279) = 0.26 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления обмотки статора [1, формула 9.186]:

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U} = 0.26 \cdot \frac{82.79}{220} = 0.098 \text{ о. е.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора [1, таблица 9.27]:

$$\begin{aligned} \lambda_{п2} &= \left[ \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c}\right)^2 + 0.66 - \frac{b_{ш2}}{2 \cdot b_1} \right] \cdot k_d + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + 1.12 \cdot \frac{h'_{ш2} \cdot 10^6}{I_2} = \\ &= \left[ \frac{0.0165}{3 \cdot 0.0071} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0.0071^2}{8 \cdot 1.5 \cdot 10^{-4}}\right)^2 + 0.66 - \frac{0.0015}{2 \cdot 0.0071} \right] \cdot 1 + \frac{0.0007}{0.0015} + 1.12 \\ &\quad \cdot \frac{0.0003 \cdot 10^6}{420.5} = 2.6 \end{aligned}$$

где

$$h_0 = h_1 + 0.4 \cdot b_2 = 0.0202 + 0.4 \cdot 0.0049 = 0.0221 \text{ м.}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, формула 9.178]:

$$\begin{aligned} \lambda_{л2} &= \frac{2.3 \cdot D_{\text{к.ср}}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \log \left( \frac{4.7 \cdot D_{\text{к.ср}}}{h_{\text{кл}} + 2 \cdot b_{\text{кл}}} \right) = \\ &= \frac{2.3 \cdot 0.203}{56 \cdot 0.213 \cdot 0.224} \cdot \log \left( \frac{4.7 \cdot 0.203}{0.034 + 2 \cdot 0.024} \right) = 0.836. \end{aligned}$$

Значение коэффициента  $\Delta_z$  находим по кривым [1, рисунки 9.51 а] исходя из размерных соотношений:

$$\frac{b_{ш2}}{\delta} = \frac{0.0015}{0.0007} = 2.143 \quad \frac{b_{ш2}}{t_2} = \frac{0.0015}{0.013} = 0.113 \quad \text{тогда} \quad \Delta_z = 0.0;$$

при закрытых пазах (примерно равен 0)  $\Delta_z = 0$

$\xi_2$  – коэффициент [1, формула 9.181]:

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \rho}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{\rho}{Z_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \rho}{56} \right)^2 = 1.003.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора [1, формула 9.180]:

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi_2 = \frac{0.013}{12 \cdot 0.0007 \cdot 1.139} \cdot 1.003 = 1.391.$$

Индуктивное сопротивление обмотки КЗ ротора:

$$\begin{aligned} x_2 &= 7.9 \cdot f \cdot l'_\delta \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) = \\ &= 7.9 \cdot 50 \cdot 0.213 \cdot (2.6 + 0.836 + 1.391) = 4.061 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Для дальнейших расчетов активное сопротивление  $x_2$  должно быть приведено к числу витков первичной обмотки [1, формула 9.177]:

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 4.061 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (56 \cdot 0.92)^2}{56} = 0.231 \text{ Ом.}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления обмотки ротора

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U} = 0.231 \cdot \frac{82.79}{220} = 0.087 \text{ о. е.}$$

Для упрощения расчёта характеристик параметры асинхронных машин выражаем в относительных единицах. Принимаем за базисные значения номинальный фазный ток и номинальное фазное напряжение.

## 1.7. Расчет потерь

В асинхронных двигателях основные потери в стали рассчитывают только в сердечнике статора, т.к. частота перемагничивания ротора, в близких режимах к номинальному, очень мала.

Основные потери в стали (потери в стали) [1, формула 9.187]:

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{\frac{1.0}{50}} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot (k_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\text{дз}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) =$$

$$= 2.5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot (1.6 \cdot 1.6^2 \cdot 46.293 + 1.8 \cdot 1.895^2 \cdot 13.367) = 690.1 \text{ Вт.}$$

из [1, таблица 9.28] для марки стали 2013 удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц:  $p_{1.0/50}=2.5 \text{ Вт/кг}$ ;

$k_{\text{да}}$  и  $k_{\text{дз}}$  – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов, принимаем согласно рекомендациям [1, с. 412]:  $k_{\text{да}}=1,6$ ;  $k_{\text{дз}}=1.8$ .

Масса стали ярма [1, формула 9.188]:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c =$$

$$= \pi \cdot (0.35 - 0.0284) \cdot 0.0284 \cdot 0.213 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 46.293 \text{ кг}$$

где удельная масса стали [1, с. 412]:  $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$ ;

Масса стали зубцов статора [1, формула 9.189]:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c =$$

$$= 0.0276 \cdot 0.0063 \cdot 48 \cdot 0.213 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 13.367 \text{ кг.}$$

Частота вращения ротора равна:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$$

$k_{01}$ ,  $k_{02}$  - коэффициенты, которые учитываются влияние обработки поверхности головок зубцов на удельные потери [1, с. 413]:

$$k_{02} = 1.6 \quad k_{01} = k_{02} = 1.6$$

Амплитуда пульсаций индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора [1, формула 9.190]:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0.32 \cdot 1.139 \cdot 0.742 = 0.27 \text{ Тл.}$$

Согласно рекомендациям по [1, рисунок 9.53], а для  $b_{\text{ш2}}/\delta=0.0015/0.7 \cdot 10^{-3}=5.3$  находим  $\beta_{02}=0.32$ .

Поверхностные потери в роторе, т.е. потери, приходящиеся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности головок зубцов [1, формула 9.192]:

$$p_{\text{пов2}} = 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 =$$

$$= 0.5 \cdot 1.6 \cdot \left( \frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.27 \cdot 0.016 \cdot 10^3)^2 = 274.083 \text{ Вт/м}^2$$

где  $k_{02}=1.6$  коэффициент учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери

Полные поверхностные потери в роторе [1, формула 9.194]:

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} \cdot (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot Z_2 \cdot l_{\delta} =$$

$$= 274.083 \cdot (0.013 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 56 \cdot 0.213 = 31.297 \text{ Вт.}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора.

Пульсация индукции в среднем сечении зубцов ротора [1, формула 9.196]:

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{z2} = \frac{2.716 \cdot 0.0007}{2 \cdot 0.016} \cdot 1.8 = 0.129 \text{ Тл.}$$

Масса стали зубцов ротора [1, формула 9.201]:

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c =$$

$$= 56 \cdot 0.027 \cdot 0.00564 \cdot 0.213 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 13.59 \text{ кг.}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора [1, формула 9.200]:

$$P_{\text{пул2}} \approx 0.11 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n_1}{1000} \cdot B_{\text{пул2}} \right)^2 \cdot m_{z2} \approx$$

$$\approx 0.11 \cdot \left( \frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0.129 \right)^2 \cdot 13.59 \approx 128.781 \text{ Вт.}$$

Так как поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми роторами очень малы, поэтому расчёт этих потерь не производим  $P_{\text{пов1}} = 0$  и  $P_{\text{пул1}} = 0$ .

Добавочные потури в стали [1, формула 9.202]:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пул1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} =$$

$$= 0 + 0 + 31.297 + 128.781 = 160.078 \text{ Вт.}$$

Полные потери в стали [1, формула 9.203]:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 690.1 + 160.078 = 850.153 \text{ Вт.}$$

Механические потери для двигателей с внешним обдувом [1, формула 9.210]:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 = 0.845 \cdot \left(\frac{1500}{10}\right)^2 \cdot 0.35^4 = 285 \text{ Вт.}$$

для двигателей с  $2p = 4$  коэффициент  $K_T = 1.3 \cdot (1 - D_a) = 1.3 - (1 - 0.35) = 0.845$ .

Добавочные потери при номинальном режиме:

$$P_{\text{доб.ном.}} = 0.005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0.005 \cdot \frac{45000}{0.915} = 246 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в стали на холостом ходу [1, формула 9.219]:

$$P_{\text{э1х.х}} = m_1 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 19.195^2 \cdot 0.086 = 94.621 \text{ Вт.}$$

Реактивная составляющая тока Х.Х. принимается приближённо равной

$$I_{\text{х.х.р}} = I_{\mu} = 19.195 \text{ А.}$$

Активная составляющая тока холостого хода [1, формула 9.218]:

$$I_{\text{х.х.а}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1х.х}}}{m_1 \cdot U} = \frac{850.153 + 285 + 94.621}{3 \cdot 220} = 1.86 \text{ А.}$$

Ток холостого хода двигателя [1, формула 9.217]:

$$I_{\text{х.х}} = \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_{\text{х.х.р}}^2} = \sqrt{1.86^2 + 19.195^2} = 19.285 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходу [1, формула 9.221]:

$$\cos\varphi_{\text{х.х}} = \frac{I_{\text{х.х.а}}}{I_{\text{х.х}}} = \frac{1.86}{19.285} = 0.097.$$

### 1.8. Расчет рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости  $P_1$ ,  $I_1$ ,  $\cos\varphi$ ,  $\eta$ ,  $s=f(P_2)$ .

Определяем величину сопротивлений схемы замещения асинхронного двигателя [1, формула 9.184]

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m_1 \cdot I_{\mu}^2} = \frac{690.075}{3 \cdot 19.195^2} = 0.624 \text{ Ом.}$$

$$r_{12}^* = \frac{r_{12} \cdot I_{1\text{НОМ}}}{U} = \frac{0.624 \cdot 82.79}{220} = 0.235 \text{ о. е.}$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора [1, формула 9.185]:

$$x_{12} = \frac{U}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{19.195} - 0.26 = 11.201 \text{ Ом.}$$

$$x_{12}^* = \frac{x_{12} \cdot I_{1\text{НОМ}}}{U} = \frac{11.201 \cdot 82.79}{220} = 4.216 \text{ о. е.}$$

Сопротивление обычно составляем  $r_{12}^*=0.05\dots0.2$ ;  $x_{12}^*=2\dots4$ .

Комплексный коэффициент [1, формула 9.223]:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.26}{11.201} = 1.023.$$

Коэффициенты для расчёта рабочих характеристик [1, формула 9.227]:

$$a' = c_1^2 = 1.023^2 = 1.046; \quad a = c_1 \cdot r_1 = 1.023 \cdot 0.086 = 0.088;$$

$$b' = 0; \quad b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2) = 1.023 \cdot (0.26 + 1.023 \cdot 0.231) = 0.508.$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода [1, формула 9.226]:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U} = \frac{690.075 + 3 \cdot 19.195^2 \cdot 0.086}{3 \cdot 220} = 1.19 \text{ А.}$$

Потери, которые не изменятся при изменении скольжения:

$$P_{\text{пост}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 850.153 + 285.306 = 1135 \text{ Вт.}$$

Данные расчета рабочих характеристик для скольжений  $s = 0.003, 0.006, 0.008, 0.0104, 0.0125, 0.046, 0.0166, 0.0187, S_{\text{НОМ}}=0,026, 0.023$  сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$$P_2 = 45 \text{ кВт}; U = 220/380 \text{ В}; 2p = 4; r_1 = 0.086 \text{ Ом};$$

$$r'_2 = 0.055 \text{ Ом}; P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 1135 \text{ Вт}; I_{0a} = 1.189 \text{ А};$$

$$I_{0p} = I_{\mu} = 19.195 \text{ А}; c_1 = 1.023; a' = 1.046; a = 0.088 \text{ Ом}; b' = 0; b = 0.508 \text{ Ом}$$

№ п/п	Расчетная формула	Раз- мер- ность	Скольжение (s)									
			0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.017	0.020	0.023	$S_{\text{ном}} = 0.026$	0.029
1	$a \cdot r'_2 / s$	Ом	18.676	9.338	6.975	5.567	4.632	3.965	3.488	3.096	2.783	2.517
2	$R = a + a \cdot r'_2 / s$	Ом	18.763	9.425	7.063	5.654	4.719	4.053	3.575	3.184	2.871	2.605
3	$X = b + b \cdot r'_2 / s$	Ом	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508
4	$Z = \sqrt{R^2 \cdot X^2}$	Ом	18.77	9.439	7.081	5.677	4.746	4.085	3.611	3.224	2.916	2.654
5	$\Gamma'_2 = U/Z$	А	11.721	23.307	31.069	38.752	46.351	53.86	60.923	68.242	75.458	82.901
6	$\cos \varphi'_2 = R/Z$	-	1	0.999	0.997	0.996	0.994	0.992	0.99	0.988	0.985	0.982
7	$\sin \varphi'_2 = X/Z$	-	0.027	0.054	0.072	0.089	0.107	0.124	0.141	0.158	0.174	0.191
8	$I_{1a} = I_{0a} + \Gamma'_2 \cdot \cos \varphi'_2$	А	12.905	24.463	32.178	39.786	47.274	54.631	61.507	68.58	75.493	82.558
9	$I_{1p} = I_{0p} + \Gamma'_2 \cdot \sin \varphi'_2$	А	19.512	20.449	21.423	22.661	24.154	25.891	27.762	29.944	32.337	35.057
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 \cdot I_{1p}^2}$	А	23.394	31.884	38.657	45.787	53.087	60.456	67.482	74.832	82.128	89.693
11	$\Gamma_2 = c_1 \cdot \Gamma'_2$	А	11.993	23.848	31.79	39.651	47.426	55.11	62.337	69.826	77.209	84.824
12	$P_1 = 3 \cdot U \cdot I_{1a}$	кВт	8.518	16.145	21.237	26.258	31.201	36.057	40.595	45.263	49.826	54.488
13	$P_{\text{с1}} = 3 \cdot \Gamma_1^2 \cdot r_1$	кВт	0.141	0.261	0.384	0.538	0.724	0.939	1.169	1.438	1.732	2.066
14	$P_{\text{с2}} = 3 \cdot \Gamma_2^2 \cdot r'_2$	кВт	0.024	0.094	0.168	0.261	0.373	0.504	0.645	0.809	0.989	1.194



15	$P_{доб} = 0.005P_1$	кВт	0.043	0.081	0.106	0.131	0.156	0.18	0.203	0.226	0.249	0.272
16	$\Sigma P = P_{пост} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{доб}$	кВт	1.342	1.572	1.793	2.066	2.388	2.758	3.153	3.609	4.106	4.668
17	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт	7.175	14.574	19.444	24.193	28.812	33.298	37.442	41.654	45.72	49.821
18	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	-	0.842	0.903	0.916	0.921	0.923	0.924	0.922	0.92	0.918	0.914
19	$\cos\varphi = I_{1a} / I_1$	-	0.552	0.767	0.832	0.869	0.89	0.904	0.911	0.916	0.919	0.92

Рабочие характеристики спроектированного двигателя с кз ротором представлены на рис. 1.3.

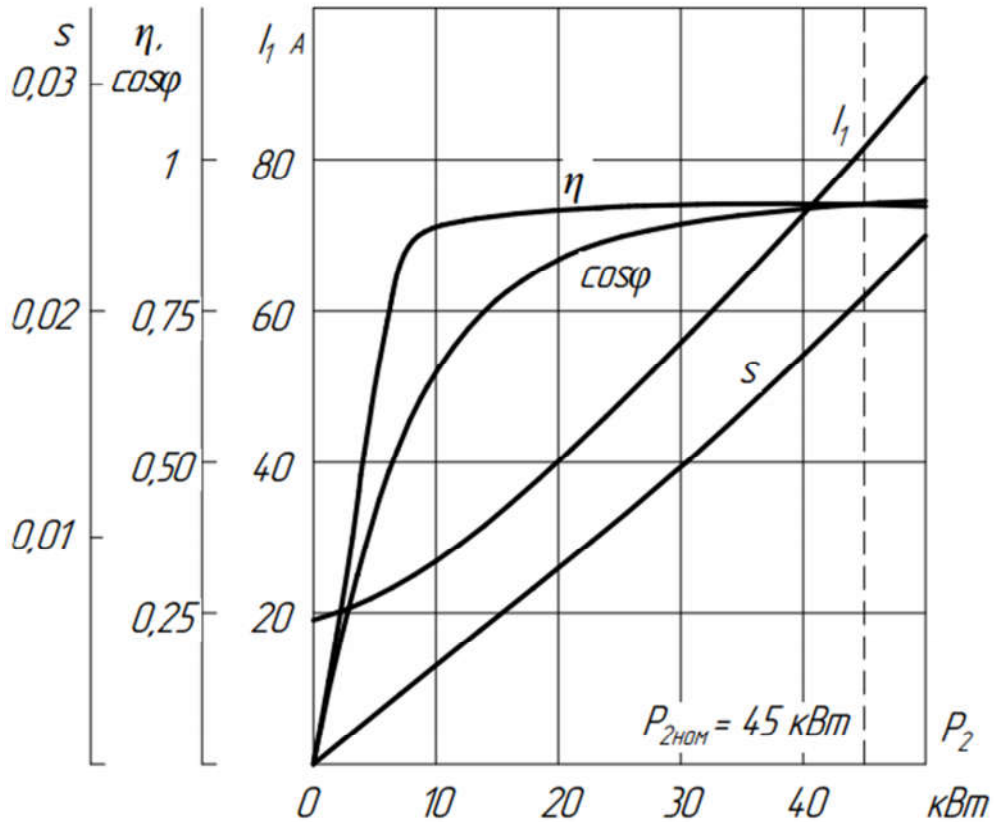


Рисунок 1.3. Рабочие характеристики

### 1.9. Расчет пусковых характеристик

Расчёт токов приведём с учётом влияния изменения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учета влияния насыщения от полей рассеяния).

Подробный расчёт приведён для  $s=1$

С учётом влияния эффекта вытеснения тока рассчитаем активное сопротивление обмотки ротора.

Найдём «приведённую высоту» стержня для литой алюминиевой обмотки при температуре плюс  $115^{\circ}\text{C}$   $\xi$  [1. формула 9.245]:

Высота стержня в пазу:

$$\varepsilon = 63.61 \cdot h_c \sqrt{s} = 63.61 \cdot 0.0262 \cdot \sqrt{1} = 1.67$$

где  $h_c = h_{п2} - (h_{ш2} + h'_{ш2}) = 0.027 - (0.0007 + 0.0003) = 0.0262$  м.

При  $\xi > 1$  эффект вытеснения тока влияет на сопротивление стержней. По значению  $\xi = 1.67$  [1. рис.9.57] определим коэффициент  $\varphi$ :  $\varphi = 0.49$

Тогда глубина проникновения тока  $h_r$  [1. формула 9.246]:

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0.0262}{1 + 0.49} = 0.0175 \text{ м.}$$

Найдём площадь сечения обмотки ротора  $q_r$  на глубине  $h_r$ , для этого предварительно определим величину  $b_r$  [1. с.429]:

$$\begin{aligned} b_r &= b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \\ &= 0.0071 - \frac{0.0071 - 0.0049}{0.014} \cdot \left( 0.0175 - \frac{0.0071}{2} \right) = 0.0056 \text{ м} \end{aligned}$$

тогда [1. формула 9.252]:

$$\begin{aligned} q_r &= \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \\ &= \frac{\pi \cdot 0.0071^2}{8} + \frac{0.0071 + 0.0049}{2} \cdot \left( 0.0175 - \frac{0.0071}{2} \right) = 1.084 \cdot 10^{-4} \text{ м.} \end{aligned}$$

Определим коэффициент  $k_r$  [1. формула 9.251]:

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{1.5 \cdot 10^{-4}}{1.084 \cdot 10^{-4}} = 1.386.$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока  $K_R$  [1. формула 9.257]:

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1 + \frac{6.919 \cdot 10^{-5}}{9.722 \cdot 10^{-5}} \cdot (1.386 - 1) = 1.27.$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом эффекта вытеснения тока  $r_{2\xi}$ : [1. формула 9.260]:

$$r_{2\xi} = K_R \cdot r_2 = 1.27 \cdot 9.722 \cdot 10^{-5} = 0.07 \text{ Ом.}$$

Приведённое активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом вытеснения тока  $r'_{2\xi}$  [1. формула 9.260]:

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 = 1.27 \cdot 0.07 = 0.0836 \text{ Ом.}$$

С учётом влияния эффекта вытеснения тока рассчитаем индуктивное сопротивление обмотки ротора. По значению  $\xi=1.67$  определим коэффициент  $\varphi'=0.84$ . [1. рис. 9.58]

Для определения коэффициента, характеризующего изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора при действия эффекта вытеснения тока  $K_x$ , найдём коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учётом этого эффекта  $\lambda_{\Pi 2\xi}$ .  $k_d = \varphi'$  [1. табл. 9.27]:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{\Pi 2\xi} &= \left[ \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{ш2}}{2 \cdot b_1} \right] \cdot (1 - k_d) = \\ &= \left[ \frac{0.0221}{3 \cdot 0.0071} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 0.0071^2}{8 \cdot 1.5 \cdot 10^{-4}} \right)^2 + 0.66 - \frac{0.0015}{2 \cdot 0.0071} \right] \cdot (1 - 0.84) = 0.22 \\ \lambda_{\Pi 2\xi} &= \lambda_{\Pi 2} - \Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = 2.6 - 0.22 = 2.382. \end{aligned}$$

Тогда коэффициент, характеризующий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока [1. формула 9.262]:

$$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = \frac{2.382 + 0.836 + 1.391}{2.6 + 0.836 + 1.391} = 0.95.$$

Приведённое индуктивное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока  $x'_{2\xi}$ :

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x = 0.231 \cdot 0.95 = 0.221 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции с уменьшением насыщения магнитопровода увеличивается. поэтому оно может быть найдено [1. формула 9.277]:

$$x_{12п} = k_\mu \cdot x_{12} = 1.4 \cdot 11.201 = 15.889 \text{ Ом.}$$

При этих допущениях коэффициент [ 1. формула 9.278 ]

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1 + \frac{0.26}{15.889} = 1.016.$$

Для расчёта токов с учётом влияния эффекта вытеснения тока, прежде найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [ 1. формула 9.280 ]:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} \cdot r'_{2\xi}}{s} = 0.086 + \frac{1.016 \cdot 0.07}{1} = 0.157 \text{ Ом};$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2\xi} = 0.26 + 1.016 \cdot 0.221 = 0.484 \text{ Ом}.$$

Ток в обмотке ротора [1. формула 9.281]:

$$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.157^2 + 0.484^2}} = 432.22 \text{ А}.$$

Ток в обмотке статора [1. формула 9.283]:

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}} =$$

$$= 432.66 \cdot \frac{\sqrt{0.157^2 + (0.484 + 15.889)^2}}{1.016 \cdot 15.889} = 438.2 \text{ А}.$$

Расчёт проводится для точек характеристик, соответствующих  $s=1;0.8;0.5;0.3;0.21;0.18;0.11;0.001$ .

Для непосредственного расчёта пусковых характеристик с учётом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния необходимо задаться предполагаемой кратностью увеличения тока  $k_{нас}$ , обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны. Ориентировочно для расчёта пусковых режимов принимают

$$k_{нас} = 1.25 - 1.4;$$

Принимаем  $k_{нас} = 1.35$

Определим среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора [1. формула 9.263]:

$$F_{п.ср} = 0.7 \cdot \frac{k_{нас} \cdot I_1 \cdot u_n}{a_1} \cdot \left( k'_\beta + k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) =$$

$$= 0.7 \cdot \frac{1.35 \cdot 438.2 \cdot 14}{2} \cdot \left( 1 + 0.92 \cdot \frac{48}{56} \right) = 5185 \text{ А.}$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре [1. формула 9.264]:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{5185 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 0.0007 \cdot 1.029} = 4.5 \text{ Тл}$$

где коэффициент [1. формула 9.265]:

$$C_N = 0.64 + 0.25 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 0.25 \cdot \sqrt{\frac{0.0007}{0.016 + 0.013}} = 1.029.$$

По полученному значению индукции определяется отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризуемое коэффициентом  $k_\delta$ . значение находят по кривой [1. рисунок 9.61]:  $k_\delta = 0.53$ .

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов по (9.266)

$$C_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{ш1}) \cdot (1 - k_\delta) = (0.016 - 0.0037) \cdot (1 - 0.53) = 0.0056.$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния [1. формула 9.269]:

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш1} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{C_{\varepsilon 1}}{C_{\varepsilon 1} + 1.5 \cdot b_{ш1}} =$$

$$= \frac{0.001 + 0.58 \cdot 0.00307}{0.0037} \cdot \frac{0.0056}{0.0056 + 1.5 \cdot 0.0037} = 0.377$$

где  $h_k = (b_{11} - b_{ш1})/2 = 0.00307 \text{ м.}$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора [1. формула 9.272]:

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 1.566 - 0.377 = 1.19.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1. формула 9.274]:

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k_{\delta} = 1.279 \cdot 0.53 = 0.678.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учётом влияния насыщения [1. формула 9.275]:

$$X_{1нас} = X_1 \cdot \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}} = 0.26 \cdot \frac{1.19 + 0.678 + 1.095}{1.566 + 1.279 + 1.095} = 0.195 \text{ Ом.}$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов ротора. магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов [1. формула 9.270]:

$$C_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0.013 - 0.0015) \cdot (1 - 0.53) = 0.0055.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения [1. формула 9.271]:

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{C_{\varepsilon 2}}{C_{\varepsilon 2} + b_{ш2}} = \frac{0.0007}{0.0015} \cdot \frac{0.0049}{0.0049 + 0.0015} = 0.367.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения и вытеснения тока [1. формула 9.273]:

$$\lambda_{п2\xiнас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас} = 2.382 - 0.367 = 2.015.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1. формула 9.274]:

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta} = 1.391 \cdot 0.53 = 0.737.$$

Приведённое индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1. формула 9.276]:

$$X'_{2\xiнас} = X'_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\xiнас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}} = 0.231 \cdot \frac{2.015 + 0.737 + 0.836}{2.6 + 1.391 + 0.836} = 0.172 \text{ Ом.}$$

Уточним коэффициент [1. формула 9.278]:

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}} = 1 + \frac{0.195}{15.889} = 1.012.$$

Найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1. формула 9.280]:

$$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0.086 + 1.012 \cdot \frac{0.07}{1} = 0.157 \text{ Ом};$$

$$X_{п.нас} = x_{1нас} + c_{1п.нас} \cdot x'_{2\xi нас} = 0.195 + 1.012 \cdot 0.172 = 0.369 \text{ Ом}.$$

Ток в обмотке ротора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1. формула 9.281]:

$$I'_{2нас} = \frac{U}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.157^2 + 0.369^2}} = 548.3 \text{ А}.$$

Ток в обмотке статора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения по [1. формула 9.283]:

$$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас}^2 + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \cdot x_{12п}} =$$

$$= 548.3 \cdot \frac{\sqrt{0.157^2 + (0.369^2 + 15.889)^2}}{1.012 \cdot 15.889} = 554.2 \text{ А}.$$

Определим кратность тока и момента при заданном  $s = 1$

$$I_{n'} = \frac{I_{1нас}}{I_{1ном}} = \frac{554.2}{82.79} = 6.75$$

$$M_{n'} = \left( \frac{I'_{2нас}}{I_{2н}} \right)^2 \cdot K_R \frac{s_H}{s} = \left( \frac{548.3}{77.209} \right)^2 \cdot 1.275 \frac{0.026}{1} = 1.34.$$

Критическое скольжение определяем после расчёта всех точек пусковых характеристик по (9.286)

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{x_{1нас}/c_{1нас} + x'_{2нас}} = \frac{0.055}{0.242/1.014 + 0.215} = 0.11.$$



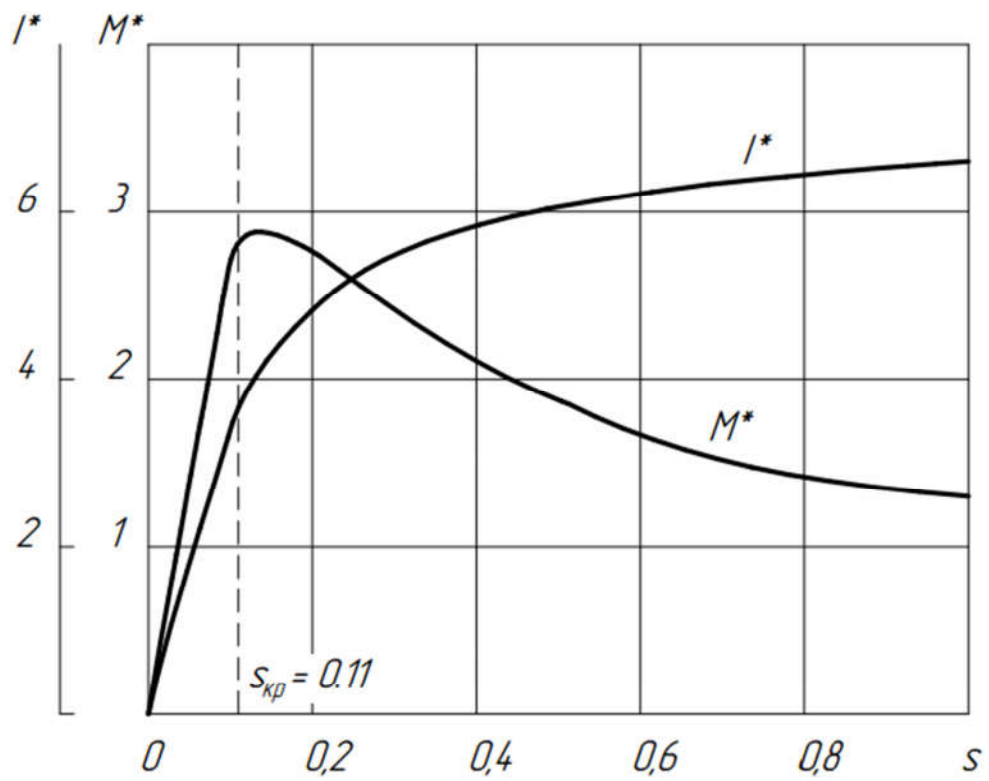


Рисунок 1.4. Пусковые характеристики

Таблица 1.2. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

№	Расчетная формула	Единица	Скольжение									
			1	0.8	0.65	0.42	0.3	0.21	0.18	0.14	Skp=0.11	0.0001
1	$k_{нас}$	-	1.35	1.31	1.27	1.23	1.19	1.15	1.11	1.08	1.04	1.00
2	$F_{п.ср} = 0.7 \cdot \frac{k_{нас} \cdot I_1 \cdot u_n}{a_1} \cdot \left(1 + k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}\right)$	А	5192.6	4980.3	4774.1	4461.5	4141.8	3736.6	3461.7	3093.9	2681.7	119.5
3	$B_{\phi\delta} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	4.504	4.32	4.141	3.87	3.592	3.241	3.002	2.683	2.326	0.104
4	$k_{\delta}$		0.53	0.548	0.566	0.599	0.639	0.69	0.725	0.771	0.823	0.997
5	$C_{э1} = (t_{z1} - b_{ш1}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	5.587	5.368	5.156	4.764	4.286	3.681	3.27	2.721	2.105	0.037
6	$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас}$	-	1.189	1.197	1.205	1.219	1.239	1.267	1.288	1.319	1.36	1.562
7	$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k_{\delta} =$	-	0.677	0.701	0.724	0.766	0.817	0.882	0.927	0.986	1.052	1.275
8	$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}}$	Ом	0.195	0.197	0.199	0.203	0.208	0.214	0.218	0.224	0.231	0.259
9	$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}}$	-	1.012	1.012	1.013	1.013	1.013	1.013	1.014	1.014	1.015	1.016

10	$C_{э2} = (t_{з2} - b_{ш2}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	5.538	5.321	5.11	4.722	4.249	3.649	3.242	2.697	2.087	0.037
11	$\lambda_{п2\xi_{нас}} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2_{нас}}$	-	2.015	2.078	2.113	2.175	2.206	2.228	2.243	2.267	2.299	2.588
12	$\lambda_{д2_{нас}} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta}$	-	0.737	0.762	0.787	0.833	0.889	0.96	1.008	1.072	1.144	1.386
13	$x'_{2_{нас}} = x'_{2} \cdot \frac{\lambda_{п2\xi_{нас}} + \lambda_{д2_{нас}} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}}$	Ом	0.172	0.176	0.179	0.184	0.188	0.193	0.196	0.2	0.205	0.23
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	0.155	0.165	0.178	0.222	0.27	0.345	0.387	0.472	0.576	$\frac{537.9}{92}$
15	$X_{п.нас} = x_{1_{нас}} + c_{1п.нас} \cdot x'_{2\xi_{нас}}$	Ом	0.369	0.376	0.38	0.39	0.398	0.409	0.417	0.427	0.439	0.493
16	$I'_{2_{нас}} = \frac{U}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}}$	А	549.7	536.3	523.6	490.8	456.8	410.9	386.7	345.7	303.7	0.4
17	$I_1 = I'_{2_{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \cdot x_{12п}}$	А	555.7	542.3	529.5	496.5	462.3	416.0	391.6	350.2	307.9	13.6
18	$k'_{нас}$		1.266	1.25	1.234	1.2	1.164	1.122	1.101	1.071	1.046	1
19	$I_{п'} = \frac{I_{1_{нас}}}{I_{1_{ном}}}$		6.766	6.603	6.447	6.046	5.629	5.065	4.768	4.265	3.748	0.166
20	$M_{п'} = \left(\frac{I'_{2_{нас}}}{I_{2н}}\right)^2 \cdot K_R \frac{S_H}{s}$		1.298	1.425	1.585	2.044	2.403	2.73	2.809	2.873	2.814	0.006

Вывод: Выбранные главные размеры двигателя составили: наружный диаметр магнитопровода статора  $D_a=0.35$  м; внутренний диаметр магнитопровода статора  $D=0.238$  м; длина воздушного зазора  $l_\delta=0.213$  м; длина сердечника статора  $l=0.213$  м.

Полученное значение коэффициента насыщения машины показало, что магнитная система машины используется в полной мере.

Число пазов статора и ротора  $Z_1=48$ .  $Z_2=56$ . Обмотка статора выбрана двухслойная петлевая. Обмотка ротора выполнена из алюминия.

Номинальное скольжение составляет  $s_{\text{ном}}=0.021$ . Рассчитанные рабочие характеристики двигателя при номинальной нагрузке показали: КПД  $\eta_{\text{ном}} = 91.8\%$ ; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 91.9\%$ .

Кратность пускового тока составила  $I_{\text{п}} = 6.76$ ; кратность пускового момента  $M_{\text{п}}=1.3$ . Полученные показатели находятся в рекомендуемых пределах.

## 2. Тепловой расчет

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя [1, формула 9.315]

$$\Delta v_{\text{пов1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{э.п1}} \cdot P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 0.2 \cdot \frac{783 \cdot 690.075}{\pi \cdot 0.238 \cdot 0.213 \cdot 115} = 16.13 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

[  $K=0.2$  коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передаётся через станину непосредственно в окружающую среду [ 1, таблица 9.35 ] для IP44  $2p=4$ ;

$$P'_{\text{э.п1}} = k_p \cdot P_{\text{э1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} = 1.07 \cdot 1732 \cdot \frac{2 \cdot 0.213}{1.008} = 783 \text{ Вт}.$$

где из табл.1 для  $s=s_{\text{ном}}$   $P_{\text{э1}}=1732$  Вт;

по рис. 9.36  $\alpha_1 = 115 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{C}^0$ ;

$k_p=1.07$  (стр. 449) ]

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора [1, формула 9.316]

$$\begin{aligned} \Delta v_{\text{из.п1}} &= \frac{P'_{\text{э.п1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{п1}} \cdot l_1} \cdot \left( \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_{11} + b_{12}}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = \\ &= \frac{783}{48 \cdot 0.06 \cdot 0.213} \cdot \left( \frac{0.0004}{0.16} + \frac{0.0098 + 0.0129}{16 \cdot 1.4} \right) = 4.567 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

[ $\Pi_{\text{п1}} = 2 \cdot h_{\text{ПК}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0.023 + 0.0071 + 0.0049 = 0.06$  м;

Для изоляции класса нагревостойкости F  $\lambda_{\text{эКВ}}=0,16$  Вт/м<sup>2</sup>;

по рис. 9.69 для  $d/d_{\text{из}}=1.6/1.685=0.95$  находим  $\lambda'_{\text{эКВ}}=1.4$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C]

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей [1, формула 9.319]

$$\begin{aligned} \Delta v_{\text{из.л1}} &= \frac{P'_{\text{э.п1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{п1}} \cdot l_1} \cdot \left( \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{h_{\text{п1}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = \\ &= \frac{1070}{2 \cdot 48 \cdot 0.06 \cdot 0.213} \cdot \left( \frac{0.05}{0.16} + \frac{0.023}{12 \cdot 1.4} \right) \cdot 10^{-3} = 0.204 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

[ по 9.314

$$P'_{\text{эл1}} = k_p \cdot P_{\text{эл1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} = 1.07 \cdot 1740 \cdot \frac{2 \cdot 0.291}{1.008} = 1070 \text{ Вт};$$

$$\Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{л1}} = 0.06 \text{ м};$$

$$b_{\text{из.л1 max}} = 0.05 \text{ мм}]$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя [1, формула 9.320]

$$\Delta v_{\text{пов.л1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot \pi \cdot D_1 \cdot l_{\text{выл}} \cdot \alpha_1} = \frac{0.2 \cdot 783}{2 \cdot \pi \cdot 0.238 \cdot 0.093 \cdot 115} = 13.323 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя [1, формула 9.321]

$$\begin{aligned} \Delta v'_1 &= \frac{(\Delta v_{\text{пов1}} + \Delta v_{\text{из.л1}}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta v_{\text{изл1}} + \Delta v_{\text{пов.л1}}) \cdot 2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} = \\ &= \frac{(16.087 + 4.567) \cdot 2 \cdot 0.213 + (0.204 + 13.232) \cdot 2 \cdot 0.291}{1.008} = 16.54 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды [1, формула 9.322]

$$\Delta v_{\text{в}} = \frac{\sum P'_{\text{в}}}{s_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{в}}} = \frac{3117}{1.719 \cdot 25} = 72.5 \text{ }^\circ\text{C}.$$

[ по (9.326)

$$\begin{aligned} \sum P'_{\text{в}} &= \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эл1}} + P_{\text{ст.очн}}) = \\ &= 4296 - (1 - 0.2) \cdot (783 + 690) = 3117 \text{ Вт} \end{aligned}$$

где  $\sum P' = \sum P + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{эл1}} + P_{\text{эл2}} =$

$$= 4106 + (1.07 - 1) \cdot (1732 + 989) = 4296 \text{ Вт};$$

$\sum P = 4341 \text{ Вт}$  из табл.1 для  $s = s_{\text{ном}}$ ;

$$\begin{aligned} s_{\text{кор}} &= (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{выл}}) = \\ &= (\pi \cdot 0.35 + 8 \cdot 0.4) \cdot (0.213 + 2 \cdot 0.093) = 1.719 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

где по рис. 9.70  $\Pi_p = 0.4 \text{ м}$  для  $h = 200 \text{ мм}$ ;

по рис. 9.67  $\alpha_{\text{в}} = 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^\circ\text{C})$  для  $D_a = 0.35 \text{ мм}$ ]

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды [1, формула 9.322]

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_B = 16.54 + 72.5 = 89.07^\circ\text{C}.$$

Тепловое состояние рассчитанной ЭМ соответствует требованиям ГОСТ 183-74, при температуре окружающей среды  $+40^\circ\text{C}$  над уровнем не более 1000 м предельно допустимая температура составляет  $115^\circ\text{C}$  – для класса нагревостойкости F. Из-за приблизительного характера расчета значение должно быть не менее чем на 20 % меньше допускаемого превышения температуры для принятого класса нагревостойкости.  $89.07^\circ\text{C} < 92^\circ\text{C}$  данное условие выполняется.

### Вентиляционный расчет

Вентиляционный расчёт асинхронных двигателей, заключается в сопоставлении расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

Проверка условий охлаждения расход воздуха [1, формула 9.340]

$$\theta_B = \frac{k_m \cdot \sum P'_B}{1100 \cdot \Delta v_B} = \frac{5.73 \cdot 3117}{1100 \cdot 72.5} = 0.22 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}}.$$

[по (9.340)]

$m'=2.5$  для  $h=200$  и  $2p=4$ ;

$$k_m = m' \cdot \sqrt{\frac{n_1}{100} \cdot D_a} = 5.73 \quad \text{коэффициент, учитывающий изменение}$$

условий охлаждения по длине поверхности корпуса обдуваемого наружным вентилятором (9.341)]

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором [1, формула 9.340]

$$\theta'_B = 0.6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n_1}{100} = 0.6 \cdot 0.35^3 \cdot \frac{1500}{100} = 0.39 \frac{\text{м}^3}{\text{сек}}.$$

Нагрев двигателя получился в допустимых пределах.

Вывод: спроектированный двигатель отвечает поставленным в техническом требованиям.



### 3. Механический расчёт

В данном этапе (механический расчёт) рассчитаем вал на прочность и на жесткость, выбираем подшипник по расчету.

#### 3.1. Расчет вала на жесткость

При расчете прогиба вала принимаем, что вся масса активной стали ротора с обмоткой и участка вала под ним приложена в виде сосредоточенной силы  $G_p$  посередине длины магнитопровода массой частей вала ближе к опорам пренебрегаем. Ротор асинхронного двигателя принимается, сплошной цилиндр с плотностью  $8300 \text{ кг/м}^3$ , его масса определяется:

$$m_p = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0.236.6^2 \cdot 0.213 = 77.5 \text{ кг.}$$

Сила тяжести ротора [1, формула 8.14]:

$$G_p = 9.81 \cdot m_p = 9.8 \cdot 77.5 = 760.311 \text{ Н.}$$

Номинальный вращающий момент [1, формула 8.18]:

$$M_H = 9550 \cdot \frac{P_{2H}}{n_H} = 9550 \cdot \frac{45}{1500} = 286.5 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Диаметр муфты по центрам пальцев:  $D_{M1} = 190 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Размеры вала представлены на рисунке 3.1.

Поперечные силы, приложенные к выступающему концу вала [1, формула 8.17]:

$$F_H = k_H \cdot \frac{M_H}{R_{M1}} = 0.3 \cdot \frac{286.5}{95} \cdot 10^{-3} = 904.737 \text{ Н.}$$

где  $k_H = 0.3$  – коэффициент при передаче муфтой [1, с. 246].

Эквивалентный момент инерции вала:  $J = \pi \cdot d^4 / 64$ .

Определим прогиб вала посередине магнитопровода ротора под действием силы тяжести [1, формула 8.15]:

$$f_G = \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) = \frac{760.311}{3 \cdot 476^2 \cdot 2.06 \cdot 10^{11}} \cdot (0.238^2 \cdot 6707.927 + 0.238^2 \cdot 6707.927) = 4.126 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

где  $E = 2.06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  – модуль упругости.

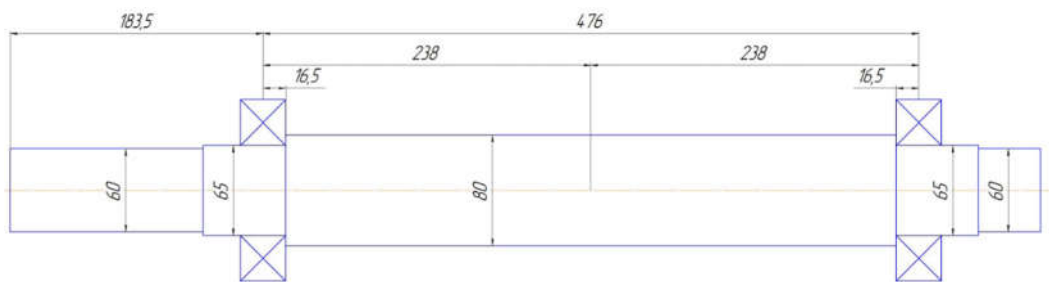


Рисунок 3.1. Эскиз вала.

Таблица 3.1. Расчет  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_0$

№ участка	Участок А					
	$d_i, \text{м}$	$J_i, \text{м}^4$	$x_i, \text{м}$	$x_i^3, \text{м}^3$	$x_i^3 - x_{i-1}^3, \text{м}^3$	$x_i^3 - x_{i-1}^3 / J_i, \text{м}^{-1}$
1	$65 \cdot 10^{-3}$	$8.762 \cdot 10^{-7}$	$16.5 \cdot 10^{-3}$	$4.492 \cdot 10^{-6}$	$4.492 \cdot 10^{-6}$	5.127
2	$80 \cdot 10^{-3}$	$2.011 \cdot 10^{-6}$	$238 \cdot 10^{-3}$	$13.5 \cdot 10^{-3}$	$13.5 \cdot 10^{-3}$	6702.8
$S_a = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} = 6707.927 \text{ м}^{-1}$						

№ участка	Участок В								
	$d_i, \text{м}$	$J_i, \text{м}^4$	$y_i, \text{м}$	$y_i^3, \text{м}^3$	$y_i^3 - y_{i-1}^3, \text{м}^3$	$y_i^3 - y_{i-1}^3 / J_i, \text{м}^{-1}$	$y_i^2, \text{м}^3$	$y_i^2 - y_{i-1}^2, \text{м}^2$	$y_i^2 - y_{i-1}^2 / J_i, \text{м}^{-2}$
1	$65 \cdot 10^{-3}$	$8.762 \cdot 10^{-7}$	$16.5 \cdot 10^{-3}$	$4.492 \cdot 10^{-6}$	$4.492 \cdot 10^{-6}$	5.127	$2.723 \cdot 10^{-4}$	$2.723 \cdot 10^{-4}$	310.702
2	$80 \cdot 10^{-3}$	$2.011 \cdot 10^{-6}$	$238 \cdot 10^{-3}$	$13.5 \cdot 10^{-3}$	$13.5 \cdot 10^{-3}$	6702.8	$56.6 \cdot 10^{-3}$	$56.4 \cdot 10^{-3}$	$2.804 \cdot 10^4$
$S_b = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = 6707.927 \text{ м}^{-1}$							$S_0 = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i} = 28347.711 \text{ м}^{-2}$		

Прогиб вала посередине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты [1, формула 8.19]:

$$f_{\Pi} = \frac{F_{\Pi} \cdot c}{3 \cdot E \cdot I^2} \cdot \left( \left( \frac{3}{2} \cdot l \cdot S_0 - S_b \right) \cdot a + b \cdot S_a \right) = \frac{904.737 \cdot 184 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.476^2} \cdot \left( \left( \frac{3}{2} \cdot 0.476 \cdot 28347.711 - 6707.927 \right) \cdot 0.238 + 0.238 \cdot 6707.927 \right) = 5.711 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Первоначальное смещение ротора [1, формула 8.20]:

$$e_0 = 0.1 \cdot \delta + f_G + f_{\Pi} = 0.1 \cdot 0.7 \cdot 10^{-3} + 4.126 \cdot 10^{-6} + 5.711 \cdot 10^{-6} = 7.984 \cdot 10^{-5} \text{ м.}$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения [1, формула 8.21]:

$$T_0 = 2.94 \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = 2.94 \cdot 0.236.6 \cdot 0.213 \cdot \frac{7.984 \cdot 10^{-6}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^5 = 1689.866 \text{ Н.}$$

Прогиб вала от силы  $T_0$  [1, формула 8.22]:

$$f_T = f_G \cdot \frac{T_0}{G_p} = 4.126 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1689.866}{706.311} = 9.171 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения [1, формула 8.23]:

$$f_M = \frac{f_T}{1 - m} = \frac{9.171 \cdot 10^{-6}}{1 - 0.115} = 10.36 \cdot 10^{-6} \text{ м;}$$

$$\text{где } m = f_T/e_0 = 9.171 \cdot 10^{-6}/7.984 \cdot 10^{-5} = 0.115.$$

Суммарный прогиб посередине магнитопровода ротора [1, формула 8.24]:

$$f = f_M + f_G + f_{\Pi} = 10.36 \cdot 10^{-6} + 4.126 \cdot 10^{-6} + 5.711 \cdot 10^{-6} = 20.2 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Суммарный прогиб в процентах длины воздушного зазора может составлять менее 10%.  $f$  составляет 2.89% от воздушного зазора, что допустимо.

Критическая частота вращения вала [1, формула 8.25]:

$$n_k = 30 \cdot \sqrt{\frac{1-m}{f_G}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1-0.115}{4.126 \cdot 10^{-6}}} = 13895 \text{ об/мин.}$$

Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической не менее чем на 30%

$$1.3 \cdot n = 1.3 \cdot 1500 = 1950 \text{ об/мин}$$

13893 > 1950 – что удовлетворяет условию.

### 3.2. Расчет вала на прочность

Нагрузка от установившегося магнитного притяжения [1, формула 8.34]:

$$T = \frac{T_0}{1-m} = \frac{1689.866}{1-0.115} = 1909.176 \text{ Н.}$$

Напряжение в сечении А [1, формула 8.31]:

$$M_{иА} = k \cdot F_{п} \cdot z_1 = 2 \cdot 904.737 \cdot 140 \cdot 10^{-3} = 253.326 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

где коэффициент перегрузки принимаем:  $k=2$ .

$z_1$  – длина выходного конца вала.

Момент сопротивления при изгибе в сечении А [1, формула 8.30]:

$$W_A = 0.1 \cdot d^3 = 0.1 \cdot (60 \cdot 10^{-3})^3 = 21.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

где  $d=0.06$  м диаметр конца вала.

Напряжение при изгибе и кручении в сечении А [1, формула 8.29]:

$$\begin{aligned} \sigma_{прА} &= \frac{1}{W_A} \cdot \sqrt{M_{иА}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2} = \\ &= \frac{1}{21.6 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{253.326^2 + (2 \cdot 0.8 \cdot 286.5)^2} = 24.25 \cdot 10^6 \text{ Па.} \end{aligned}$$

где отношение возможного напряжение при изгибе к удвоенному напряжению при кручении принимаем:  $\alpha=0.8$ .

Напряжение в сечении Б [1, формула 8.32]:

$$M_{иБ} = k \cdot F_{п} \cdot c \cdot \left(1 - \frac{y_1}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{\alpha \cdot y_1}{l} = 2 \cdot 904.737 \cdot 184 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$\cdot \left( 1 - \frac{16.5 \cdot 10^{-3}}{0.476} \right) + (760.311 + 1912.823) \cdot \frac{0.238 \cdot 16.5 \cdot 10^{-3}}{0.476}$$

$$= 342.582 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении Б [1, формула 8.30]:

$$W_B = 0.1 \cdot d_1^3 = 0.1 \cdot (65 \cdot 10^{-3})^3 = 27.46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Напряжение при изгибе и кручении в сечении Б [1, формула 8.29]:

$$\sigma_{\text{прБ}} = \frac{1}{W_B} \cdot \sqrt{M_{\text{иБ}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2} =$$

$$= \frac{1}{27.46 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{342.582^2 + (2 \cdot 0.8 \cdot 286.5)^2} = 20.84 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Напряжение в сечении В [1, формула 8.33]:

$$M_{\text{иВ}} = [k \cdot F_n \cdot c + (G_p + T) \cdot b] \cdot \frac{x_1}{l} = [2 \cdot 904.737 \cdot 184 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ (760.311 + 1912.823) \cdot 0.238] \cdot \frac{16.5 \cdot 10^{-3}}{0.476} = 33.56 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении В [1, формула 8.30]:

$$W_B = 0.1 \cdot d_2^3 = 0.1 \cdot (65 \cdot 10^{-3})^3 = 27.46 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Напряжение при изгибе и кручении в сечении В [1, формула 8.29]:

$$\sigma_{\text{прВ}} = \frac{1}{W_B} \cdot \sqrt{M_{\text{иВ}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2} =$$

$$= \frac{1}{27.46 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{33.56^2 + (2 \cdot 0.8 \cdot 286.5)^2} = 16.74 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

### 3.3. Выбор подшипников

Динамическая и статическая грузоподъёмности является основным критерием работоспособности подшипника качения.

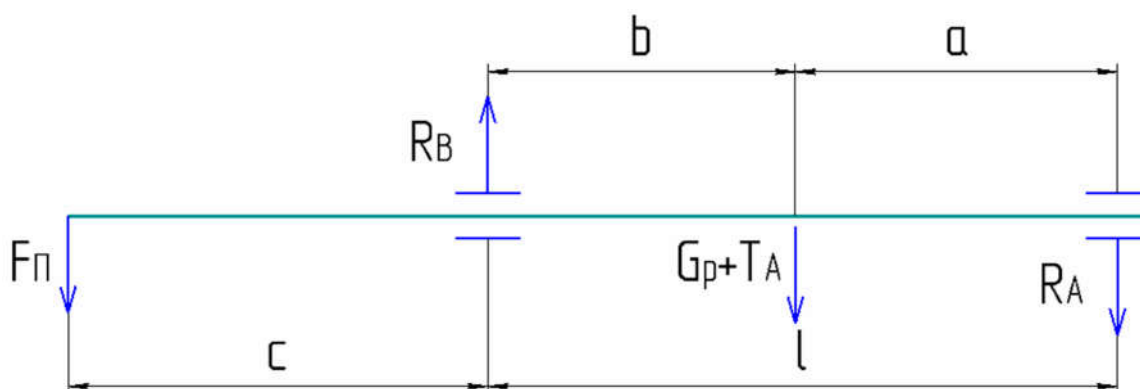


Рисунок 3.2. Радиальные реакции подшипников

Радиальная нагрузка на опоре А [1, формула 8.37]:

$$R_A = F_{\Pi} \cdot \frac{c}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{b}{l} = 904.737 \cdot \frac{0.184}{0.476} + (760.311 + 1689.866) \cdot \frac{0.238}{0.476} = 1573.868 \text{ Н.}$$

Приведенная нагрузка [1, формула 8.35]:

$$Q_A = K_H \cdot R_A = 1.5 \cdot 1573.868 = 2360.802 \text{ Н.}$$

где  $K_H = 1.5$  – коэффициент учитывающий характер нагрузки двигателя, при нагрузке с умеренными толчками.

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника [1, формула 8.38]:

$$C = \frac{Q_A}{25.6} \cdot \sqrt[3]{L_d \cdot n} = \frac{2360.802}{25.6} \cdot \sqrt[3]{15 \cdot 10^3 \cdot 1500} = 26034 \text{ Н.}$$

Срок службы (или долговечность) подшипника принимаем:  $L_d = 15 \cdot 10^3$  ч

Радиальная нагрузка на опоре В [1, формула 8.36]:

$$R_B = F_{\Pi} \cdot \frac{l + c}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{a}{l} = 904.737 \cdot \frac{0.476 + 0.184}{0.476} + (760.311 + 1689.866) \cdot \frac{0.238}{0.476} = 2478.605 \text{ Н.}$$

Приведенная нагрузка [1, формула 8.35]:

$$Q_B = K_H \cdot R_B = 1.5 \cdot 2478.605 = 3717.908 \text{ Н.}$$

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника [1, формула 8.38]:

$$C = \frac{Q_B}{25.6} \cdot \sqrt[3]{L_d \cdot n} = \frac{3717.908}{25.6} \cdot \sqrt[3]{15 \cdot 10^3 \cdot 1500} = 41000 \text{ Н.}$$

Принимаем по таблице П5.1 [1, с. 734] шарикоподшипник радиальный однородный, средняя серия, условное обозначение 313,  $d=65$  мм,  $D=140$  мм,

$B=33$  мм,  $r=3.5$  мм, динамическая грузоподъёмность  $C_0=55600$  Н,  $n=4000$  об/мин. ГОСТ 8338-75.

Вывод: В результате механического раздела суммарный прогиб вала, который составляет 2.89% от воздушного зазора, что это допустимо. Критическая частота вращения вала составила  $n_k = 13895$  об/мин. Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической менее 30%.

$1.3 \cdot n = 1.3 \cdot 1500 = 1950$  об/мин;  $13895 > 1950$  – что удовлетворяет требованию.

Из полученных следует, что самым нагруженным является сечение А. Допустимое значение напряжения не должно превышать 0,7 от предела текучести стали. Для стали марки 45 предел текучести  $3600 \cdot 10^5$  Па.

$$\sigma_{\text{пр}} = 2.425 \cdot 10^7 < 0.7 \cdot 3.6 \cdot 10^8 \text{ – условие выполняется.}$$

По результатам расчета принимаем шарикоподшипники радиальный однородный 313 средней серии.



#### 4. Специальная часть

В данном разделе проведен пересчет ротора. Проведена замена материала обмотки ротора с алюминия на медь. Статор электродвигателя сохранил все основные параметры.

##### 4.1. Расчет ротора

Величину воздушного зазора выберем из [1, рисунок 9.31] для  $2p=4$  и  $D=0.238$  м:  $\delta=0.57$  мм.

Выбор число пазов ротора обосновывается наилучшие сочетания  $Z_1$  и  $Z_2$ , которые рекомендованы в таблицу 9.18 [1, сс.373-374].

Выбираем число пазов ротора  $Z_2=56$ .

Диаметр ротора (внешний):

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 238 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0.57 \cdot 10^{-3} = 237 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Принимаем длина магнитопровода ротора:  $l_2 = l_1 = 0.213$  м.

Зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0.237}{56} = 0.013 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр сердечника ротора равен диаметру вала [1, формула 9.102]:

$$D_B = k_B \cdot D_a = 0.23 \cdot 0.35 = 0.08 \text{ м;}$$

(по [1, таблица 9.19] для  $h=71-225$  мм и  $2p=2-8$ :  $k_B=0.23$ ).

Принимаем  $D_j = D_B = 0.08$  м.

Ток в стержне обмотки ротора [1, формула 9.57]:

Коэффициент учитывающий влияние тока намагничивания [1, формула 9.58]:

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.9 = 0.92.$$

Коэффициент приведения токов с кз роторами [1, формула 9.66]:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 56 \cdot 0.92}{56} = 5.52;$$

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 0.92 \cdot 82.79 \cdot 5.52 = 420.5 \text{ А.}$$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) [ 1, формула 9.68 ]:

плотность тока в стержне принимаем  $J_2=3.88 \cdot 10^6$

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{420.5}{3.88 \cdot 10^6} = 1.084 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Выбираем пазы ротора с прямоугольными пазами и медными стержнями.

Размеры шлица:  $b_{ш2} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

Высота шлица:  $h_{ш2} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;

Коэффициент заполнения сталью  $k_c=0.97$ .

Допустимая ширина зубца [1, формула 9.75]:

Выбираем допустимую индукцию для зубцов ротора [1, таблица 9.12]:

$B_{z2} = 1.75 \text{ Тл}$ ;  $l_{ст2}=l_{ст1}=0.213 \text{ м}$ ;

$$b_{z2\text{доп}} = \frac{B_\delta \cdot t_2 \cdot l_\delta}{B_{z2} \cdot l_{ст2} \cdot k_c} = \frac{0.742 \cdot 0.013 \cdot 0.213}{1.75 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 5.8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Размеры паза ротора:

$$h_{вп2} = h_{стерж} + \Delta_{пп} = 0.028 + 0.0002 = 0.0282 \text{ м};$$

$$b_{шп2} = b_{стерж} + \Delta_{пп} = 0.004 + 0.0002 = 0.0042 \text{ м}.$$

Уточняем ширину зубцов ротора [1, формула 9.80, 9.81]

$$\begin{aligned} b_{z20} &= \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{ш2}}{Z_2} - b_{шп2} = \\ &= \pi \cdot \frac{0.237 - 2 \cdot 0.001}{56} - 0.0042 = 0.009 \text{ м} \\ b_{z21} &= \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{вп2}}{Z_2} - b_{шп2} = \\ &= \pi \cdot \frac{0.237 - 2 \cdot 0.0282}{56} - 0.0042 = 0.0058 \text{ м} \end{aligned}$$

Полная высота паза:

$$h_{п2} = h_{вп2} + h_{ш2} = 0.0282 + 0.001 = 0.0292$$

Площадь сечения стержня (поперечная):

$$q_c = h_{стерж} \cdot b_{стерж} = 0.0028 \cdot 0.004 = 1.12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

плотность тока в стержне  $J_2 = \frac{I_2}{q_c} = 3.754 \cdot 10^6 \text{ А/м.}$

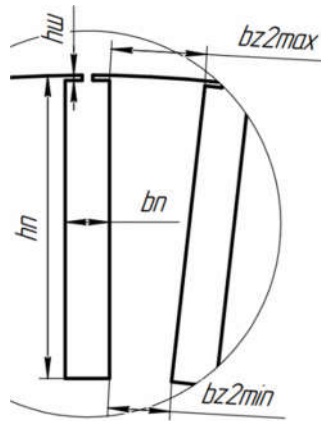


Рис. 4.1. паз ротора.

Короткозамыкающие кольца.

$$\text{коэффициент } \Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 2}{56}\right) = 0.224$$

Ток в короткозамыкающем кольце [ 1, формула 9.70 ]:

$$I_{\text{ккл}} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{420.47}{0.0224} = 1877.68 \text{ А.}$$

Плотность тока в замыкающих кольцах выбирают в среднем на 15 - 20% меньше, чем в стержнях с целью снижения общего сопротивления КЗ обмотки ротора.

$$J_{\text{ккл}} = 0.85 \cdot J_2 = 3.191 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Площадь поперечного сечения кольца [ 1, формула 9.72 ]:

$$q_{\text{ккл}} = \frac{I_{\text{ккл}}}{J_{\text{ккл}}} = \frac{1877.68}{3.191 \cdot 10^6} = 5.884 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Размеры короткозамыкающих колец:

$$\text{Высота: } h_{\text{ккл}} = 1.25 \cdot h_{\text{п2}} = 1.25 \cdot 0.0292 = 0.037 \text{ м;}$$

$$\text{Толщина: } b_{\text{ккл}} = \frac{q_{\text{ккл}}}{h_{\text{ккл}}} = \frac{5.884 \cdot 10^{-4}}{0.037} = 0.016 \text{ м;}$$

$$\text{Сечение: } q_{\text{ккл}} = h_{\text{ккл}} \cdot b_{\text{ккл}} = 0.036 \cdot 0.016 = 5.884 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

Среднее значение диаметра КЗ кольца:

$$D_{\text{к.ср}} = D_2 - h_{\text{ккл}} = 0.237 - 0.036 = 0.201 \text{ м.}$$

## 4.2. Расчет магнитной цепи

Индукцию в зубце статора [1, формула 9.105]:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{b_{z1} \cdot k_{c1}} = \frac{0.742 \cdot 0.016}{6 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97} = 1.9 \text{ Тл.}$$

Индукцию в зубце ротора [1, формула 9.109]:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{b_{z2} \cdot k_c} = \frac{0.742 \cdot 0.013}{5.8 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97} = 1.75 \text{ Тл.}$$

Индукцию в ярме статора [1, формула 9.117]:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{ст1} \cdot k_c} = \frac{0.019}{2 \cdot 0.028 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 1.6 \text{ Тл.}$$

Расчетная высота спинки ротора [1, формула 9.123]:

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{0.237 - 0.08}{2} - 0.0292 = 0.0492 \text{ м.}$$

Индукцию в ярме ротора [1, формула 9.122]:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_{ст2} \cdot k_c} = \frac{0.019}{2 \cdot 0.0492 \cdot 0.213 \cdot 0.97} = 0.816 \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора [1, формула 9.103]:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.742 \cdot 0.57 \cdot 10^{-3} \cdot 1.202 = 808.6 \text{ А.}$$

Магнитная пропорциональность  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м.}$

Коэффициент воздушного зазора [1, формула 4.17]:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1.155 \cdot 1.041 = 1.202.$$

Коэффициент воздушного зазора для статора [1, формула 4.14]:

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.016}{0.016 \cdot 2.716 \cdot 0.57 \cdot 10^{-3}} = 1.155.$$

где по [1, формула 4.15]:

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш}/\delta)^2}{5 + b_{ш}/\delta} = \frac{(3.7 \cdot 10^{-3}/0.57 \cdot 10^{-3})^2}{5 + 3.7 \cdot 10^{-3}/0.57 \cdot 10^{-3}} = 3.667.$$

Коэффициент воздушного зазора для ротора [1, формула 4.14]:

при  $h'_{ш2} = 0$ ,

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.013}{0.013 \cdot 2.716 \cdot 0.57 \cdot 10^{-3}} = 1.041.$$

Расчётная высота зубца статора и ротора

$$h_{z1} = h_n = 0.0276 \text{ м};$$

$$h_{z2} = h_{n2} = 0.02871 \text{ м}.$$

Напряженность зубцовой зоны статора и ротора [1, таблица П1.7]:

коэффициент, учитывающий ответвление потока в паз статора (4.33)

C.179

$H_{z1} = 2070 \text{ Тл}$ ,  $B_{z1} = 1.9 > 1.8$  Считать коэффициент ответвление

$$k_{п1} = \frac{b_{11} + b_{22}}{2 \cdot b_{z1} \cdot k_{c1}} = \frac{0.0098 + 0.0129}{2 \cdot 0.006 \cdot 0.97} = 1.87.$$

Принимаем:

$$B_{z1} = B_{z1} - \mu_0 \cdot H_{z1} \cdot k_{п1} = 1.9 - 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2070 \cdot 1.87 = 1.895 \text{ Тл}.$$

$$H_{z1} = 2010 \text{ Тл} \quad \text{для} \quad B_{z1} = 1.895 \text{ Тл}.$$

Напряжение (магнитное) зубцовой зоны статора [1, формула 9.104]:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0.0276 \cdot 2010 = 110.81 \text{ А}.$$

Напряжение (магнитное) зубцовой зоны ротора [1, формула 9.108]:

Расчетная напряженность поля в зубцах ротора с изменяющейся площадью поперечного сечения [1, формула 9.108]

$$B_{z2\max} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{b_{z2\min} \cdot k_c} = \frac{0.742 \cdot 0.013}{5.8 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97} = 1.75 \text{ Тл};$$

$$B_{z2\min} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{b_{z2\max} \cdot k_c} = \frac{0.742 \cdot 0.013}{9 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97} = 1.13 \text{ Тл};$$

$$B_{z2\text{cp}} = 0.5 \cdot (B_{z2\max} + B_{z2\min}) = 0.5 \cdot (1.75 + 1.13) = 1.44 \text{ Тл};$$

$$H_{z2} = \frac{H_{z2\max} + 4H_{z2\text{cp}} + H_{z2\min}}{6} = \frac{1770 + 4 \cdot 658 + 385}{6} = 798 \text{ Тл}.$$

где

$$H_{z2\max} = 1770 \text{ Тл} \quad \text{для} \quad B_{z2\max} = 1.85 \text{ Тл};$$

$$H_{z2\min} = 385 \text{ Тл} \quad \text{для} \quad B_{z2\min} = 1.13 \text{ Тл};$$

$$H_{z2\text{cp}} = 658 \text{ Тл} \quad \text{для} \quad B_{z2\text{cp}} = 1.13 \text{ Тл};$$

тогда магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0.0292 \cdot 798 = 46.603 \text{ А}.$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны [1, формула 9.115]:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{110.81 + 46.603}{808.599} = 1.2$$

значение коэффициента насыщения зубцовой зоны удовлетворяет требованиям (1.2-1.5).

Средней длина магнитной силовой линии в ярме статора по [1, формула 9.127]:

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.35 - 0.028)}{2 \cdot 2} = 0.2526 \text{ м.}$$

Напряженность поля в ярме статора при индукции  $B_a=1.6$  Тл находим по [1, таблица П1.6]:  $H_a=750$  А/м.

Напряжение (магнитное) ярма статора [1, формула 9.116]:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.2526 \cdot 750 = 189.418 \text{ А.}$$

Высота спинки ротора [1, формула 9.126]:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{0.237 - 0.080}{2} - 0.0292 = 0.0492 \text{ м.}$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора [1, формула 9.127]:

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.080 + 0.0492)}{2 \cdot 2} = 0.1015 \text{ м.}$$

Напряженность поля в ярме ротора при индукции  $B_j=0.816$  Тл находим по [1, таблица П1.6]:  $H_j=126$  А/м.

Магнитное напряжение ярма ротора [1, формула 9.121]:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.1015 \cdot 126 = 11.298 \text{ А.}$$

Суммарное магнитное напряжение цепи (на пару полюсов) [1, формула 9.128]:

$$\begin{aligned} F_\mu &= F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = \\ &= 808.599 + 110.812 + 46.603 + 189.418 + 11.279 = 1168.22 \text{ А.} \end{aligned}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя [1, формула 9.129]:

$$k_\mu = \frac{F_\mu}{F_\delta} = \frac{1168.22}{808.599} = 1.44$$

полученное значение  $k_{\mu}$ , соответствует рекомендованному диапазону (1.25÷1.6)

Намагничивающий ток [1, формула 9.130]:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{ц}}{0.9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = \frac{2 \cdot 1168.22}{0.9 \cdot 3 \cdot 56 \cdot 0.92} = 16.796 \text{ А.}$$

Намагничивающий ток в процентах или долях номинального тока двигателя [1, формула 9.130]:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}} = \frac{16.796}{82.79} = 0.2$$

Относительное значение  $I_{\mu}^*$  находится в допустимых пределах (0.18 – 0.4). Значит, габариты двигателя выбраны, верно, и двигатель будет иметь неплохие КПД,  $\cos\phi$ .

### 4.3. Параметры рабочего режима

Проводим расчет основных параметров ротора асинхронного двигателя с медной обмоткой.

#### Активное сопротивление обмотки ротора

Активное сопротивление обмотки ротора [1, формула 9.168]:

Удельная эл. Сопротивление меди при расчётной температуре

$$\rho_{2115} = 10^{-6}/41 = 2.439 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$$

Сопротивление стержня обмотки ротора [1, С406, формула 9.169]: , где для вставной медный стержень обмотки ротора

$$r_c = \rho_{2115} \cdot \frac{l_2}{q_c} = 2.439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.213}{1.12 \cdot 10^{-4}} = 4.639 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Сопротивление участка кольца (короткозамыкающего), заключённого между двумя соседними стержнями [1, С406, формула 9.170]:

$$r_{кл} = \rho_{2115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{к.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = 2.439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{\pi \cdot 0.2}{56 \cdot 5.884 \cdot 10^{-4}} = 4.659 \cdot 10^{-7} \text{ Ом;}$$

и тогда [1, С406, формула 9.168]:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 4.639 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 4.659 \cdot 10^{-7}}{0.224^2} = 6.5 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

Для дальнейших расчетов активное сопротивление  $r_2$  должно быть приведено к числу витков обмотки статора [1, формула 9.172-9.173]:

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 6.5 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (56 \cdot 0.92)^2}{56} = 0.037 \text{ Ом.}$$

Относительное значение активного сопротивления обмотки ротора

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1НОМ}}{U} = 0.037 \cdot \frac{82.79}{220} = 0.014 \text{ о. е.}$$

### Индуктивное сопротивление обмотки ротора

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора [1, таблица 9.27]:

$$\lambda_{п2} = \frac{h_0}{3 \cdot b_{шп2}} \cdot k_d + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} = \frac{0.0292}{3 \cdot 0.0042} \cdot 1 + \frac{0.001}{0.0015} = 2.984;$$

где

$$h_0 = h_{п2} = 0.0292 \text{ м.}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, формула 9.178]:

$$\begin{aligned} \lambda_{л2} &= \frac{2.3 \cdot D_{к.ср}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \log \left( \frac{4.7 \cdot D_{к.ср}}{h_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} \right) = \\ &= \frac{2.3 \cdot 0.2}{56 \cdot 0.213 \cdot 0.224} \cdot \log \left( \frac{4.7 \cdot 0.2}{0.027 + 2 \cdot 0.024} \right) = 0.733. \end{aligned}$$

Значение коэффициента  $\Delta_z$  находим по кривым [1, рисунки 9.51 а] исходя из размерных соотношений:

$$\frac{b_{ш2}}{\delta} = \frac{0.001}{0.00057} = 2.632 \quad \frac{b_{ш2}}{t_2} = \frac{0.0015}{0.013} = 0.113 \quad \text{тогда} \quad \Delta_z = 0.017.$$

$\xi_2$  – коэффициент [1, формула 9.181]:

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot \rho}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Z_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{56} \right)^2 - \frac{0.017}{1 - \left( \frac{2}{56} \right)^2} = 0.9855.$$



Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора [1, формула 9.180]:

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi_2 = \frac{0.013}{12 \cdot 0.00057 \cdot 1.202} \cdot 0.9855 = 1.593.$$

Индуктивное сопротивление обмотки КЗ ротора:

$$\begin{aligned} x_2 &= 7.9 \cdot f \cdot l'_\delta \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) = \\ &= 7.9 \cdot 50 \cdot 0.213 \cdot (2.984 + 0.733 + 1.593) = 4.468 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Для дальнейших расчетов активное сопротивление  $x_2$  должно быть приведено к числу витков первичной обмотки [1, формула 9.177]:

$$x'_{2} = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 4.468 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (56 \cdot 0.92)^2}{56} = 0.254 \text{ Ом.}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления обмотки ротора

$$x'_{2*} = x'_{2} \cdot \frac{I_{1НОМ}}{U} = 0.254 \cdot \frac{82.79}{220} = 0.096 \text{ о. е.}$$

#### 4.4. Расчет потерь

Основные потери в стали (потери в стали основные) [1, формула 9.187]:

$$\begin{aligned} P_{ст.осн} &= p_{\frac{1.0}{50}} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot (k_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = \\ &= 2.5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot (1.6 \cdot 1.6^2 \cdot 46.293 + 1.8 \cdot 1.895^2 \cdot 13.367) = 690.1 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

из [1, таблица 9.28] для марки стали 2013 удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц:  $p_{1.0/50}=2.5$  Вт/кг;

$k_{да}$  и  $k_{дз}$  – коэффициенты:  $k_{да}=1.6$ ;  $k_{дз}=1.8$ ;

Масса стали ярма [1, формула 9.188]:

$$\begin{aligned} m_a &= \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = \\ &= \pi \cdot (0.35 - 0.0284) \cdot 0.0284 \cdot 0.213 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 46.293 \text{ кг;} \end{aligned}$$

где удельная масса стали [1, с. 412]:  $\gamma_c = 7800$  кг/м<sup>3</sup>

Масса стали зубцов статора [1, формула 9.189]:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c =$$

$$= 0.0276 \cdot 0.0063 \cdot 48 \cdot 0.213 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 13.367 \text{ кг.}$$

Частота вращения ротора равна:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/мин.}$$

$k_{01}, k_{02}$  - коэффициенты [1, с. 413]:  $k_{01} = k_{02} = 1.6$ ;

Амплитуда пульсаций индукции в  $\delta$  (воздушный зазор) над коронками зубцов ротора [1, формула 9.190]:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0.355 \cdot 1.202 \cdot 0.742 = 0.32 \text{ Тл.}$$

Согласно рекомендациям по [1, рисунок 9.53], а для  $b_{ш1}/\delta=0.0037/0.57 \cdot 10^{-3}=6.5$  находим  $\beta_{02}=0.355$ .

Поверхностные потери в роторе [1, формула 9.192]:

$$\begin{aligned} p_{пов2} &= 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 0.5 \cdot 1.6 \cdot \left( \frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.32 \cdot 0.016 \cdot 10^3)^2 = 375.485 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

где  $k_{02}=1.6$ .

Полные поверхностные потери в роторе [1, формула 9.194]:

$$\begin{aligned} P_{пов2} &= p_{пов2} \cdot (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot Z_2 \cdot l_{\delta} = \\ &= 375.485 \cdot (0.013 - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot 56 \cdot 0.213 = 42.942 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора.

Пульсация индукции в среднем сечении зубцов ротора [1, формула 9.196]:

$$B_{пул2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{z2} = \frac{3.667 \cdot 0.00057}{2 \cdot 0.013} \cdot 1.75 = 0.138 \text{ Тл.}$$

Масса стали зубцов ротора [1, формула 9.201]:

$$\begin{aligned} m_{z2} &= Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c = \\ &= 56 \cdot 0.0292 \cdot 0.007 \cdot 0.213 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 19.48 \text{ кг.} \end{aligned}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора [1, формула 9.200]:

$$P_{пул2} \approx 0.11 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n_1}{1000} \cdot B_{пул2} \right)^2 \cdot m_{z2} \approx$$

$$\approx 0.11 \cdot \left( \frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0.138 \right)^2 \cdot 19.48 \approx 210.457 \text{ Вт.}$$

Так как поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми роторами очень малы, поэтому расчёт этих потерь не производим  $P_{пов1} = 0$  и  $P_{пул1} = 0$ .

Добавочные потери в стали [1, формула 9.202]:

$$\begin{aligned} P_{ст.доб} &= P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} = \\ &= 0 + 0 + 42.942 + 210.457 = 253.399 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Полные потери в стали [1, формула 9.203]:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 690.1 + 253.399 = 943.474 \text{ Вт.}$$

Механические потери для двигателей с внешним обдувом [1, формула 9.210]:

$$P_{мех} = K_T \cdot \left( \frac{n_1}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 0.845 \cdot \left( \frac{1500}{10} \right)^2 \cdot 0.35^4 = 285 \text{ Вт.}$$

для двигателей с  $2p = 4$  коэффициент  $K_T = 1.3 \cdot (1 - D_a) = 1.3 - (1 - 0.35) = 0.845$ ;

Добавочные потери при номинальном режиме:

$$P_{доб.ном.} = 0.005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0.005 \cdot \frac{45000}{0.915} = 246 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в стали про холостом ходу [1, формула 9.219]:

$$P_{э1х.х} = m_1 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 16.796^2 \cdot 0.086 = 72.45 \text{ Вт.}$$

Реактивная составляющая тока Х.Х. принимается приближённо равной

$$I_{х.х.р} = I_{\mu} = 16.796 \text{ А.}$$

Активная составляющая тока холостого хода [1, формула 9.218]:

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1х.х}}{m_1 \cdot U} = \frac{943.474 + 285 + 72.45}{3 \cdot 220} = 1.97 \text{ А.}$$

Ток холостого хода двигателя [1, формула 9.217]:

$$I_{х.х} = \sqrt{I_{х.х.а}^2 + I_{х.х.р}^2} = \sqrt{1.97^2 + 16.796^2} = 16.912 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходу [1, формула 9.221]:

$$\cos\varphi_{x,x} = \frac{I_{x,x,a}}{I_{x,x}} = \frac{1.97}{16.912} = 0.117.$$

Определяем величину сопротивлений схемы замещения асинхронного двигателя [1, формула 9.184]:

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн}}{m_1 \cdot I_{\mu}^2} = \frac{690.075}{3 \cdot 16.796^2} = 0.815 \text{ Ом.}$$

$$r_{12}^* = \frac{r_{12} \cdot I_{1ном}}{U} = \frac{0.815 \cdot 82.79}{220} = 0.307 \text{ о. е.}$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора [1, формула 9.185]:

$$x_{12} = \frac{U}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{16.796} - 0.274 = 12.825 \text{ Ом.}$$

$$x_{12}^* = \frac{x_{12} \cdot I_{1ном}}{U} = \frac{12.825 \cdot 82.79}{220} = 4.826 \text{ о. е.}$$

#### 4.5. Расчет рабочих характеристик

Комплексный коэффициент [1, формула 9.223]:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.26}{12.825} = 1.021.$$

Коэффициенты для расчёта рабочих характеристик [1, формула 9.227]:

$$a' = c_1^2 = 1.021^2 = 1.043 \quad a = c_1 \cdot r_1 = 1.021 \cdot 0.086 = 0.087;$$

$$b' = 0; \quad b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') = 1.021 \cdot (0.26 + 1.021 \cdot 0.254) = 0.544;$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода [1, формула 9.226]:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U} = \frac{690.075 + 3 \cdot 16.796^2 \cdot 0.086}{3 \cdot 220} = 1.16 \text{ А.}$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{пост} = P_{ст} + P_{мех} = 943.474 + 285.306 = 1229 \text{ Вт.}$$

Данные расчета рабочих характеристик для скольжении  $s = 0.0028, 0.0042, 0.0056, 0.007, 0.0083, 0.0097, 0.0111, 0.0125, 0.014, 0.0153, S_{ном}=0.014$  сведены в таблицу 1.1.

Таблица 4.1. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$P_2 = 45$  кВт;  $U = 220/380$  В;  $2p = 4$ ;  $r_1 = 0.086$  Ом;

$r'_2 = 0.037$  Ом;  $P_{ст} + P_{мех} = 1229$  Вт;  $I_{0a} = 1.155$  А;

$I_{0p} = I_{\mu} = 16.796$  А;  $c_1 = 1.021$ ;  $a' = 1.043$ ;  $a = 0.087$  Ом;  $b' = 0$ ;  $b = 0.544$  Ом

№ п/п	Расчетная формула	Раз- мер- ность	Скольжение (s)										
			0	0,0028	0,0042	0,0056	0,007	0,0083	0,0097	0,0111	0,0125	$s_{ном} =$ 0.014	0.015
1	$a \cdot r'_2/s$	Ом	27.71	19.27	9.636	6.883	5.507	4.644	3.974	3.473	3.084	2.772	2.519
2	$R = a + a' \cdot r'_2/s$	Ом	27.80	19.36	9.724	6.971	5.594	4.731	4.061	3.56	3.171	2.859	2.607
3	$X = b + b' \cdot r'_2/s$	Ом	0.544	0.544	0.544	0.544	0.544	0.544	0.544	0.544	0.544	0.544	0.544
4	$Z = \sqrt{R^2 \cdot X^2}$	Ом	27.81	19.36	9.739	6.992	5.62	4.763	4.098	3.601	3.217	2.911	2.663
5	$\Gamma'_2 = U/Z$	А	7.911	11.35	22.589	31.465	39.143	46.192	53.69	61.087	68.376	75.587	82.61
6	$\cos\varphi'_2 = R/Z$	-	1	1	0.998	0.997	0.995	0.993	0.991	0.989	0.986	0.982	0.979
7	$\sin\varphi'_2 = X/Z$	-	0.02	0.028	0.056	0.078	0.097	0.114	0.133	0.151	0.169	0.187	0.204
8	$I_{1a} = I_{0a} + \Gamma'_2 \cdot \cos\varphi'_2$	А	1.155	12.51	23.709	32.525	40.114	47.044	54.37	61.54	68.545	75.408	82.02
9	$I_{1p} = I_{0p} + \Gamma'_2 \cdot \sin\varphi'_2$	А	16.796	17.116	18.059	19.247	20.589	22.077	23.931	26.032	28.368	30.937	33.68
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 \cdot I_{1p}^2}$	А	16.836	21.2	29.804	37.793	45.089	51.967	59.403	66.82	74.183	81.507	88.672
11	$\Gamma_2 = c_1 \cdot \Gamma'_2$	А	8.08	11.601	23.071	32.136	39.978	47.177	54.836	62.39	69.835	77.2	84.375
12	$P_1 = 3 \cdot U \cdot I_{1a}$	Вт	1.229	8.256	15.648	21.467	26.475	31.049	35.884	40.616	45.24	49.769	54.135
13	$P_{\gamma 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$	Вт	0.073	0.115	0.228	0.367	0.522	0.694	0.906	1.147	1.413	1.706	2.019

14	$P_{\vartheta 2}=3 \cdot \Gamma_2^2 \cdot r_2$	Вт	0.007	0.015	0.059	0.114	0.177	0.247	0.333	0.432	0.541	0.661	0.789
15	$P_{\text{доб}}=$ $=0,005P_1$	Вт	0.006	0.041	0.078	0.107	0.132	0.155	0.179	0.203	0.226	0.249	0.271
16	$\Sigma P=P_{\text{пост}}+P_{\vartheta 1}+P_{\vartheta 2}+$ $+P_{\text{доб}}$	Вт	1.229	1.4	1.594	1.817	2.06	2.324	2.648	3.01	3.409	3.844	4.308
17	$P_2=P_1-\Sigma P$	Вт	0	6.856	14.054	19.649	24.415	28.725	33.236	37.606	41.831	45.925	49.827
18	$\eta=1-\Sigma P/P_1$	-	0	0.83	0.898	0.915	0.922	0.925	0.926	0.926	0.925	0.923	0.92
19	$\cos \varphi=I_{1a}/I_1$	-	0.069	0.59	0.796	0.861	0.89	0.905	0.915	0.921	0.924	0.925	0.925

Рабочие характеристики спроектированного двигателя с кз ротором  
 ( $P_2 = 25$  кВт;  $U = 220/380$  В;  $2p = 4$ ;  $I_{1\text{ном}} = 82.79$  А;  $\eta_{\text{ном}} = 0.913$ ;  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0.921$ )

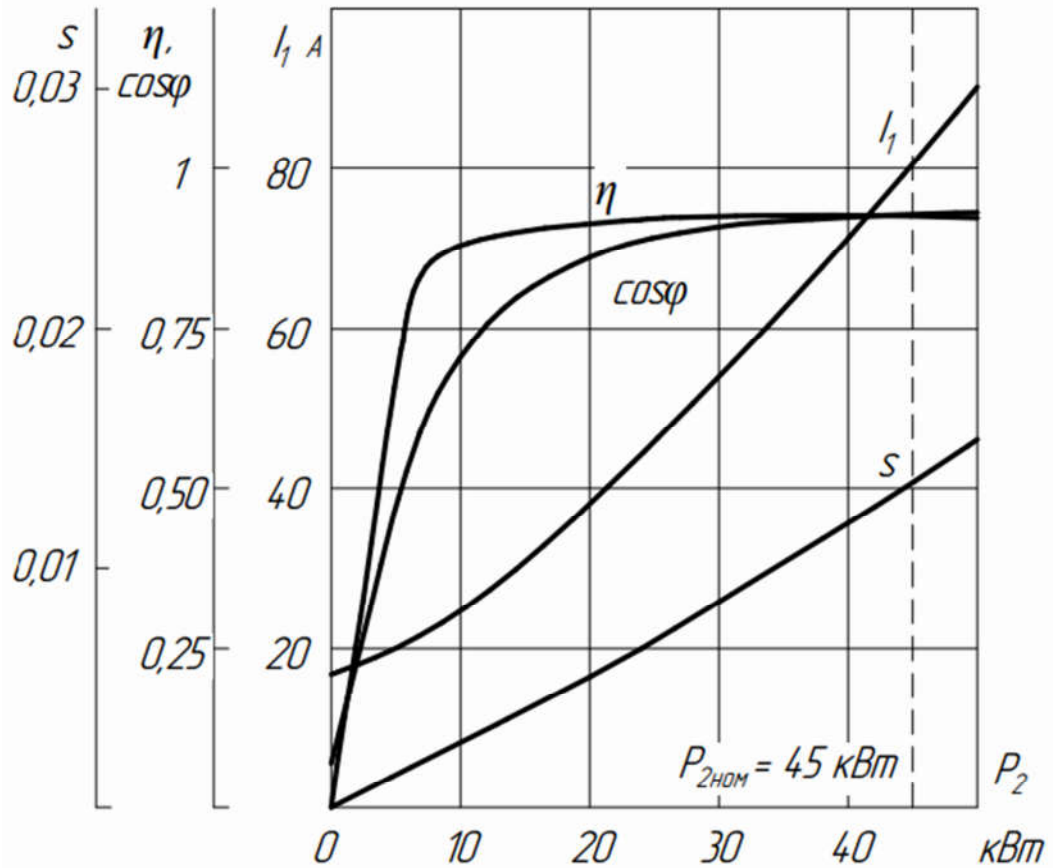


Рисунок 4.2. Рабочие характеристики.

#### 4.6. Расчет пусковых характеристик

Проводим расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с медной обмоткой.

Найдём «приведённую высоту» стержня для медной обмотки при температуре плюс  $115^{\circ}\text{C}$   $\xi$  [1, с.427, 9.245]:

Высота стержня в пазу:

$$\varepsilon = 89.96 \cdot h_c \sqrt{s} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_\pi}} = 89.96 \cdot 0.0282 \cdot \sqrt{1} \cdot \sqrt{\frac{0.0042}{0.0038}} = 2.67;$$

где  $h_c = h_{\pi 2} - (h_{\text{ш}2} + h'_{\text{ш}2}) = 0.0287 - (0.0005 + 0.0) = 0.0282$  м;

$$b_c = b_{\text{ш}2} = 0.0042 \quad b_\pi = 0.9 \cdot b_c = 0.0038 \text{ м};$$

По значению  $\xi=2,67$  [1, с. 428, рис.9.57] определим коэффициент  $\varphi$ :  $\varphi=1.61$

Тогда глубина проникновения тока  $h_r$  [1, с.427, 9.246]:

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0.0282}{1 + 1.61} = 0.0108 \text{ м.}$$

Определим коэффициент  $k_r$  [1, с.429, 9.250]:

$$k_r = \frac{h_c}{h_r} = \frac{0.0282}{0.0108} = 2.61.$$

Коэффициент  $K_R$  [1, с.430, 9.258]:

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot \varphi = 1 + \frac{4.639 \cdot 10^{-5}}{6.5 \cdot 10^{-5}} \cdot 1.61 = 2.15.$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом эффекта вытеснения тока  $r_{2\xi}$ : [1, с.431, 9.260]:

$$r_{2\xi} = K_R \cdot r_2 = 2.15 \cdot 6.5 \cdot 10^{-5} = 1.395 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

Приведённое активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом вытеснения тока  $r'_{2\xi}$ : [1, с.431, 9.260]:

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 = 2.15 \cdot 0.037 = 0.079 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока. По значению  $\xi=2.67$  определим коэффициент  $\varphi'=1,61$ . [1, с.432, рис. 9.58]

Для определения коэффициента, характеризующего изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока  $K_x$ , найдём коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учётом этого эффекта  $\lambda_{\pi 2\xi}$ ,  $k_d = \varphi'=0.565$  по рис.9.58 [1, с.408, табл. 9.27]:



$$\Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = \frac{h_0}{3 \cdot b_{\text{шп}2}} \cdot (1 - k_d) = 0.0292 / (3 \cdot 0.0042) \cdot (1 - 0.565) = 1.01.$$

$$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = 2.984 - 1.01 = 1.976.$$

Тогда коэффициент, характеризующий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока [1, с.431, 9.262]:

$$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = \frac{1.976 + 0.733 + 1.593}{2.984 + 0.733 + 1.593} = 0.81.$$

Приведённое индуктивное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока  $x'_{2\xi}$ :

$$x'_{2\varepsilon} = x'_2 \cdot K_x = 0.254 \cdot 0.81 = 0.206 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление взаимной индукции с уменьшением насыщения магнитопровода увеличивается, поэтому оно может быть найдено [1, С437, формула 9.277 ]:

$$x_{12\Pi} = k_\mu \cdot x_{12} = 1.445 \cdot 12.825 = 18.528 \text{ Ом.}$$

При этих допущениях коэффициент [1, С437, формула 9.278 ]

$$c_{1\Pi} = 1 + \frac{x_1}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{0.274}{18.528} = 1.015.$$

Для расчёта токов с учётом влияния эффекта вытеснения тока, прежде найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1, С437, формула 9.280 ]:

$$R_\Pi = r_1 + \frac{c_{1\Pi} \cdot r'_{2\xi}}{s} = 0.086 + \frac{1.015 \cdot 0.079}{1} = 0.166 \text{ Ом;}$$

$$X_\Pi = x_1 + c_{1\Pi} \cdot x'_{2\xi} = 0.274 + 1.015 \cdot 0.206 = 0.483 \text{ Ом.}$$

Ток в обмотке ротора [1, с.437, 9.281]:

$$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.166^2 + 0.483^2}} = 431.11 \text{ А.}$$

Ток в обмотке статора [1, с.437, 9.283]:

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{\pi}^2 + (X_{\pi} + X_{12\pi})^2}}{C_{1\pi} \cdot X_{12\pi}} =$$

$$= 431.11 \cdot \frac{\sqrt{0.166^2 + (0.483 + 12.825)^2}}{1.015 \cdot 12.825} = 435.9 \text{ А.}$$

Расчёт проводим для точек характеристик, соответствующих  $s=1;0.8;0.5;0.2;0.15;0.14;0.1;0.001$ , при этом используем значения токов и сопротивлений для тех же скольжений с учётом влияния вытеснения тока (см.табл.9.37).

Данные расчёта сведены в таблицу. Подробный расчёт приведён для  $s=1$

$$k_{\text{нас}} = 1.25 - 1.4;$$

Принимаем  $k_{\text{нас}} = 1.3$ .

Определим среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора [1, формула 9.263]:

$$F_{\text{п.ср}} = 0.7 \cdot \frac{k_{\text{нас}} \cdot I_1 \cdot u_{\text{н}}}{a_1} \cdot \left( k'_{\beta} + k_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) =$$

$$= 0.7 \cdot \frac{1.3 \cdot 435.9 \cdot 14}{2} \cdot \left( 1 + 0.92 \cdot \frac{48}{56} \right) = 4967 \text{ А.}$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре [1, формула 9.264]:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{4967 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 0.00057 \cdot 0.991} = 5.49 \text{ Тл};$$

где коэффициент [1, формула 9.265]:

$$C_N = 0.64 + 0.25 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 0.25 \cdot \sqrt{\frac{0.00057}{0.016 + 0.013}} = 0.991.$$

По кривой [1, рисунок 9.61]:  $k_{\delta} = 0.45$ .

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов по (9.266)

$$C_{э1} = (t_{z1} - b_{ш1}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0.016 - 0.0037) \cdot (1 - 0.45) = 0.0065.$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния [1, формула 9.269]:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{п1нас} &= \frac{h_{ш1} + 0.58 \cdot h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{C_{э1}}{C_{э1} + 1.5 \cdot b_{ш1}} = \\ &= \frac{0.001 + 0.58 \cdot 0.00307}{0.0037} \cdot \frac{0.0065}{0.0065 + 1.5 \cdot 0.0037} = 0.406. \end{aligned}$$

где  $h_k = (b_{11} - b_{ш1})/2 = 0.00307$  м.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора [1, формула 9.272]:

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 1.566 - 0.406 = 1.16.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, формула 9.274]:

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k_{\delta} = 1.486 \cdot 0.45 = 0.669.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, формула 9.275]:

$$X_{1нас} = X_1 \cdot \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}} = 0.26 \cdot \frac{1.16 + 0.669 + 1.095}{1.566 + 1.486 + 1.095} = 0.193 \text{ Ом.}$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов ротора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов [1, формула 9.270]:

$$C_{э2} = (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0.013 - 0.001) \cdot (1 - 0.45) = 0.0065.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения [1, формула 9.271]:

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{C_{э2}}{C_{э2} + b_{ш2}} = \frac{0.001}{0.0015} \cdot \frac{0.0065}{0.0065 + 0.0015} = 0.541.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения и вытеснения тока [1, формула 9.273]:

$$\lambda_{п2\xiнас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас} = 1.435 - 0.541 = 1.359.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, формула 9.274]:

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta} = 1.593 \cdot 0.45 = 0.718.$$

Приведённое индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1, формула 9.276]:

$$x'_{2\xiнас} = x'_{2} \cdot \frac{\lambda_{п2\xiнас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}} = 0.223 \cdot \frac{1.435 + 0.718 + 0.733}{2.984 + 1.593 + 0.733} = 0.138 \text{ Ом.}$$

Уточним коэффициент [1, формула 9.278]:

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}} = 1 + \frac{0.193}{18.528} = 1.01.$$

Найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1, формула 9.280]:

$$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0.086 + 1.01 \cdot \frac{0.079}{1} = 0.166 \text{ Ом.}$$

$$X_{п.нас} = x_{1нас} + c_{1п.нас} \cdot x'_{2\xiнас} = 0.193 + 1.01 \cdot 0.138 = 0.332 \text{ Ом.}$$

Ток в обмотке ротора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1, формула 9.281]:

$$I'_{2нас} = \frac{U}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.166^2 + 0.332^2}} = 592.2 \text{ А.}$$

Ток в обмотке статора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1, формула 9.283]:

$$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас}^2 + x_{12п})^2}}{C_{1п.нас} \cdot X_{12п}} =$$

$$= 592.2 \cdot \frac{\sqrt{0.166^2 + (0.332^2 + 18.528)^2}}{1.01 \cdot 18.528} = 596.7 \text{ А.}$$

Определим кратность тока и момента при заданном  $s = 1$

$$I_{п'} = \frac{I_{1нас}}{I_{1н}} = \frac{596.7}{82.79} = 7.32.$$

$$M_{п'} = \left( \frac{I'_{2нас}}{I_{2н}} \right)^2 \cdot \frac{s_H}{s} = \left( \frac{592.229}{77.2} \right)^2 \cdot \frac{0.014}{1} = 1.76.$$

Критическое скольжение определяем по (9.286)

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{X_{1нас}/C_{1нас} + x'_{2нас}} = \frac{0.037}{0.247/1.012 + 0.228} = 0.08.$$

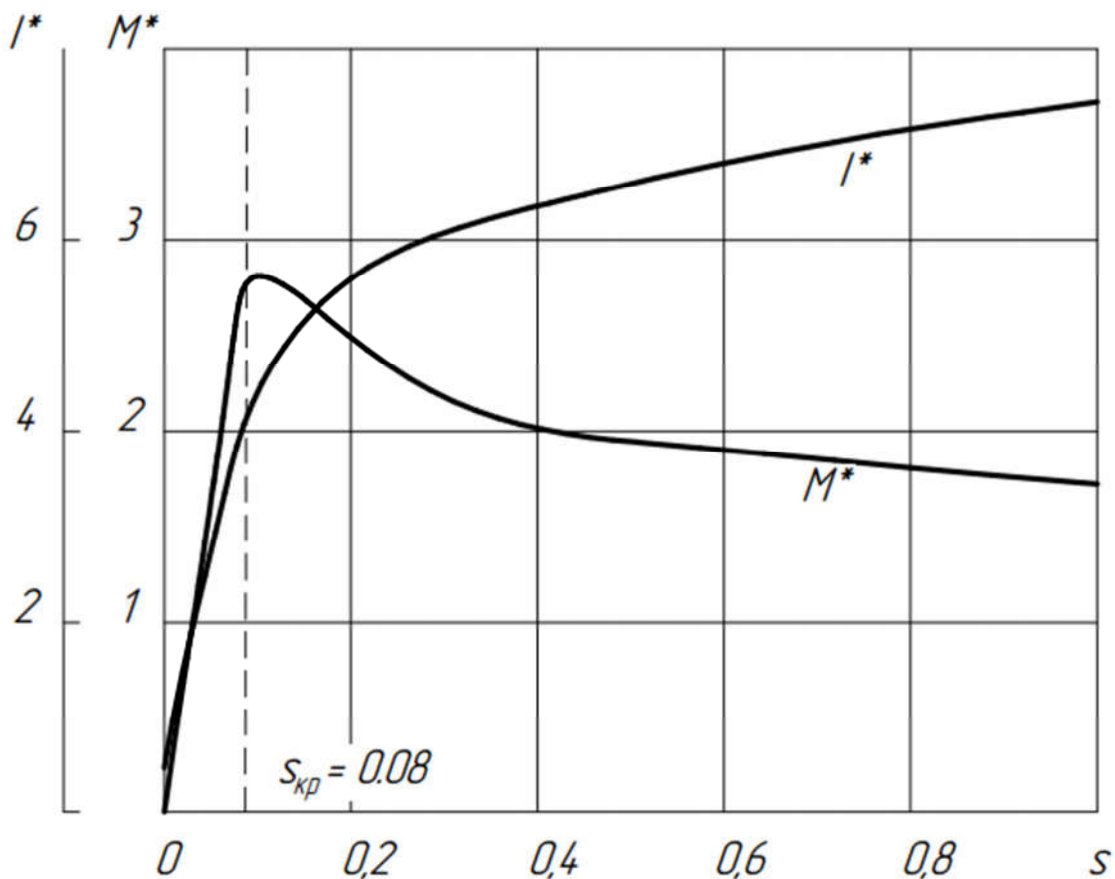


Рисунок 4.3. Пусковые характеристики.

Таблица 4.2. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

№	Расчетная формула	Единица	Скольжение									
			1	0.8	0.6	0.42	0.3	0.2	0.12	0.095	Skp=0 .08	0.000 1
1	$k_{нас}$	-	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0
2	$F_{п.ср} = 0.7 \cdot \frac{k_{нас} \cdot I_1 \cdot u_n}{a_1} \cdot \left(1 + k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}\right)$	А	4966	4718	4439	4165.4	3937	3648	3181	2872	2606	102.7
3	$B_{\phi\delta} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	5.493	5.219	4.91	4.607	4.355	4.035	3.519	3.177	2.883	0.114
4	$k_{\delta}$		0.45	0.467	0.489	0.519	0.544	0.576	0.65	0.699	0.742	0.997
5	$C_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{ш1}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	6.528	6.332	6.07	5.71	5.41	5.03	4.161	3.571	3.064	0.04
6	$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас}$	-	1.16	1.166	1.174	1.185	1.195	1.209	1.244	1.272	1.299	1.561
7	$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k_{\delta} =$	-	0.669	0.694	0.727	0.772	0.809	0.857	0.965	1.039	1.103	1.481
8	$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}}$	Ом	0.193	0.195	0.198	0.201	0.204	0.208	0.218	0.225	0.231	0.273
9	$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}}$	-	1.01	1.011	1.011	1.011	1.011	1.011	1.012	1.012	1.012	1.015
10	$C_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	6.479	6.284	6.024	5.667	5.37	4.992	4.129	3.544	3.041	0.04
11	$\lambda_{п2\xi нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас}$	-	1.435	1.594	1.821	2.038	2.198	2.306	2.409	2.439	2.468	2.964
12	$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta}$	-	0.718	0.744	0.779	0.827	0.867	0.918	1.035	1.114	1.182	1.588

13	$x'_{2нас} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\xiнас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}}$	Ом	0.138	0.147	0.16	0.172	0.182	0.189	0.2	0.205	0.21	0.253
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	0.166	0.176	0.191	0.211	0.237	0.292	0.412	0.491	0.563	375.0 52
15	$X_{п.нас} = x_{1нас} + c_{1п.нас} \cdot x'_{2\xiнас}$	Ом	0.332	0.343	0.359	0.375	0.388	0.4	0.42	0.432	0.443	0.53
16	$I'_{2нас} = \frac{U}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}}$	А	592.2	570.1	541.1	510.9	483.5	444.0	373.9	336.3	307.1	0.6
17	$I_1 = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \cdot x_{12п}}$	А	596.6	574.7	545.8	515.7	488.3	448.6	378.1	340.2	310.7	11.7
18	$k'_{нас}$		1.369	1.345	1.315	1.28	1.25	1.207	1.135	1.1	1.076	1
19	$I_{п'} = \frac{I_{1нас}}{I_{1н}}$		7.32	7.05	6.696	6.327	5.991	5.504	4.638	4.174	3.812	0.144
20	$M_{п'} = \left(\frac{I'_{2нас}}{I_{2н}}\right)^2 \cdot \frac{S_H}{s}$		1.758	1.836	1.931	2.043	2.214	2.545	2.846	2.86	2.808	0.008

В специальной части дипломного проекта был спроектирован ротор с медной обмоткой. В результате получены повышенные значения КПД  $\eta_{\text{ном}} = 92.3\%$ ; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 92.5\%$ . Полученные значения кратности пускового тока и кратности пускового момента находятся рекомендуемых пределах.



## Заключение

В процессе выполнения данной выпускной квалификационной работы был спроектирован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, отвечающий поставленному заданию: номинальной полезной мощности; высоте оси вращения; частоте вращения; способу охлаждения; степени защиты; способу монтажа; классу нагревостойкости изоляции.

Выбранные главные размеры двигателя составили: наружный диаметр магнитопровода статора  $D_a=0,35$  м; внутренний диаметр магнитопровода статора  $D=0,238$  м; длина воздушного зазора  $l_\delta=0,213$  м; длина сердечника статора  $l=0,213$  м.

Полученное значение коэффициента насыщения машины показало, что магнитная система машины используется в полной мере.

Число пазов статора и ротора  $Z_1=48$ ,  $Z_2=56$ . Обмотка статора выбрана двухслойная петлевая. Обмотка ротора выполнена из алюминия.

Номинальное скольжение составляет  $s_{ном}=0,021$ . Рассчитанные рабочие характеристики двигателя при номинальной нагрузке показали: КПД  $\eta_{ном}=91,8\%$ ; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{ном}=91,9\%$ .

Кратность пускового тока составила  $I_{п}=6,766$ ; кратность пускового момента  $M_{п}=1,3$ . Полученные показатели находятся в рекомендуемых пределах.

Проведены тепловой, механический и вентиляционный расчёты проектируемого электродвигателя. Нагрев электродвигателя находится допустимых пределах для выбранного класса изоляция (91,9 С). В результате механического расчета был определен суммарный прогиб вала, который составляет 2,89% от воздушного зазора. Вентиляционный расчет показал, что наружный вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

В специальной части дипломного проекта был спроектирован ротор с медной обмоткой. В результате получены повышенные значения КПД  $\eta_{ном}=92,3\%$ ; коэффициент мощности  $\cos\varphi_{ном}=92,5\%$ . Полученные значения

кратности пускового тока и кратности пускового момента также находятся рекомендуемых пределах.

В результате выполнения технологической части данной работы была создана документация для технологического процесса по общей сборке спроектированного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, при годовом объёме производства в 4000 штук.

Был проведён анализ технологичности конструкции статора, который показал преимущество многих технических решений для оптимизации процесса производства.

Также была составлена маршрутная карта, в которой поэтапно отражены все операции по общей сборке. В соответствии с маршрутной картой был выполнен выбор оборудования и оснастки. Анализ загрузки оборудования показал необходимость в оснащении каждым видом оборудования в единственном экземпляре.

В экономической части составлена смета затрат на проектирование данного двигателя и проведена оценка конкурентоспособности спроектированного двигателя.

В разделе «Социальная ответственность» были рассмотрены разделы микроклимата, техника безопасности рабочего в различных ситуациях, пожарная безопасность и охрана окружающей среды при производстве асинхронных двигателей.

В целом спроектированный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором удовлетворяет требованиям определенным заданием.