

## Содержание

1. Введение	4
2. Выбор основных размеров двигателя	5
3. Расчет обмоток статора и ротора	7
4. Расчет магнитной цепи, потерь и КПД	17
5. Расчет параметров и построение рабочих и пусковых характеристик	30
6. Тепловой расчет	41
Заключение	45
Список использованных источников	46

## 1. Введение

Согласно заданию необходимо спроектировать трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью 37 кВт, с частотой вращения – 1500 об/мин, напряжением 220 / 380 В при частоте 50Гц; ротор – фазный, исполнение двигателя по степени защиты IP44 . В качестве базовой модели принята конструкция асинхронного двигателя серии 4АК.

При проектировании использована методика и рекомендации, содержащиеся в [1].

diplom-electro.ru

## 2. Выбор основных размеров двигателя

Число пар полюсов определяется по формуле

$$p = 60 \cdot \frac{f_1}{n_1} \quad (2.1)$$

$$p = 60 \cdot \frac{50}{1500} = 2$$

По [1, табл. 9.1] при заданной мощности и числе полюсов находим стандартную высоту вращения  $h = 200$  мм

Наружный диаметр статора по [1, табл. 9.8] для данной оси вращения

$$D_a = 0,359 \text{ м}$$

Внутренний диаметр статора

$$D = K_D \cdot D_a \quad (2.2)$$

$$D = 0,67 \cdot 0,359 = 0,241 \text{ м}$$

где  $K_D$  по [1, табл. 9.9]  $K_D = 0,67$

Полюсное деление

$$\tau = \pi \cdot \frac{D}{2p} \quad (2.3)$$

$$\tau = 3,14 \cdot \frac{0,241}{4} = 0,189 \text{ м}$$

Расчетная мощность по (9.4)

$$P' = P_{2\text{НОМ}} \cdot 10^3 \cdot \frac{K_e}{\cos\varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} \quad (2.4)$$

$$P' = 37 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,98}{0,89 \cdot 0,9} = 45268,4 \text{ В} \cdot \text{А}$$

где  $K_e$  по [1, рис. 9.20];  $\eta$  и  $\cos\varphi$  — по [1, рис. 9.21]

$$K_e = 0,98; \cos\varphi_{\text{НОМ}} = 0,89; \eta_{\text{НОМ}} = 0,9$$

Электромагнитные нагрузки предварительно по [1, рис. 9.22]

$$A = 36000 \frac{\text{А}}{\text{м}}; B_\delta = 0,78 \text{ Тл}$$

Обмоточный коэффициент (предварительно для двухслойной обмотки)

$$k_{об} = 0,92$$

Коэффициент формы поля

$$k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11$$

Синхронная угловая скорость вала двигателя

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_1}{60} \quad (2.5)$$

$$\Omega = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{1500}{60} = 157,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Расчетная длина магнитопровода по (9.6)

$$l_{\delta} = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{об} \cdot A \cdot B_{\delta}} \quad (2.6)$$

$$l_{\delta} = \frac{45268,4}{1,11 \cdot 0,241^2 \cdot 157,1 \cdot 0,92 \cdot 36000 \cdot 0,78} = 0,17 \text{ м}$$

В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250...300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции  $l_{ст1} = l_{\delta} = 0,17 \text{ м}$

Конструктивная длина сердечника статора  $l_1 = l_{ст1} = 0,17 \text{ м}$

Проверка правильности выбора размеров двигателя

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau} \quad (2.7)$$

$$\lambda = \frac{0,17}{0,189} = 0,9$$

Значение  $\lambda$  находится в допустимых пределах [1,рис. 9.25].

### 3. Расчет обмоток статора и ротора

Предельные значения зубцевого деления (по рис. 9.26)

$$t_{z1\max} = 0,016 \text{ м}; t_{z1\min} = 0,013 \text{ м}$$

Число пазов статора по (9.16)

$$Z_{1\min} = \pi \cdot \frac{D}{t_{z1\max}} \quad (3.1)$$

$$Z_{1\min} = 3,14 \cdot \frac{0,241}{0,016} = 47$$

$$Z_{1\max} = \pi \cdot \frac{D}{t_{z1\min}} \quad (3.2)$$

$$Z_{1\max} = 3,14 \cdot \frac{0,241}{0,013} = 58$$

Принимаем по [1, табл. 9.18]  $Z_1 = 48$

тогда

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} \quad (3.3)$$

$$q = \frac{48}{4 \cdot 3} = 4$$

где число фаз  $m = 3$

Обмотка двухслойная концентрическая  $n_{\text{сл}} = 2$

Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_{z1} = \pi \cdot \frac{D}{2p \cdot m \cdot q} \quad (3.4)$$

$$t_{z1} = 3,14 \cdot \frac{0,241}{4 \cdot 3 \cdot 4} = 0,0158 \text{ м} = 15,8 \text{ мм}$$

Номинальный ток обмотки статора (по 9.18)

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{P_{2\text{НОМ}} \cdot 10^3}{m \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} \quad (3.5)$$

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{37 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,9} = 69,99 \text{ А}$$

Число эффективных проводников в пазу, предварительно при условии  $a = 1$  по (9.17)

$$u'_\pi = \pi \cdot D \cdot \frac{A}{I_{1\text{ном}} \cdot Z_1} \quad (3.6)$$

$$u'_\pi = 3,14 \cdot 0,241 \cdot \frac{36000}{69,99 \cdot 48} = 8,1 \text{ шт}$$

Принимаем число параллельных ветвей  $a = 2$  шт

тогда по (9.19)

$$u_\pi = a \cdot u'_\pi \quad (3.7)$$

$$u_\pi = 2 \cdot 8,1 = 16,2 \text{ шт принимаем } 16 \text{ шт}$$

Окончательные значения:

число витков в фазе по (9.20)

$$w_1 = u_\pi \cdot \frac{Z_1}{2 \cdot a \cdot m} \quad (3.8)$$

$$w_1 = 16 \cdot \frac{48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 64 \text{ шт}$$

линейная нагрузка по (9.21)

$$A = 2 \cdot I_{1\text{ном}} \cdot w_1 \cdot \frac{m}{\pi \cdot D} \quad (3.9)$$

$$A = 2 \cdot 69,99 \cdot 64 \cdot \frac{3}{3,14 \cdot 0,241} = 35498 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

магнитный поток по (9.22)

$$\Phi = K_e \cdot \frac{U_{1\text{ном}}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot K_{061} \cdot f_1} \quad (3.10)$$

$$\Phi = 0,98 \cdot \frac{220}{4 \cdot 1,11 \cdot 64 \cdot 0,958 \cdot 50} = 0,0158 \text{ Вб}$$

индукция в магнитном зазоре

$$B_\delta = \rho \cdot \frac{\Phi}{D \cdot \ell_\delta} \quad (3.11)$$

$$B_\delta = 2 \cdot \frac{0,0158}{0,241 \cdot 0,17} = 0,771 \text{ Тл}$$

где при  $q = 4$  по [1, табл. 3.16]

$$K_{p1} = 0,958$$

Расчетный шаг по [1, (3.9)]

$$U_{расч} = 2 \cdot (q + 1) \quad (3.12)$$

$$U_{расч} = 2 \cdot (4 + 1) = 10$$

Принимаем шаг обмотки  $y = 10$

Укорочение шага [1, 3.12]

$$\beta = \frac{y}{\tau_1} \quad (3.13)$$

$$\beta = \frac{10}{12} = 0,833$$

$$\tau_1 = \frac{Z_1}{2p} \quad (3.14)$$

$$\tau_1 = \frac{48}{4} = 12$$

Коэффициент укорочения (3.6)

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right) \quad (3.15)$$

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{3,14}{2} \cdot 0,833\right) = 0,966$$

$$K_{об1} = K_{p1} \cdot k_{y1} \quad (3.16)$$

$$K_{об1} = 0,958 \cdot 0,966 = 0,925$$

для  $D_a = 0,272$  м по [1, рис. 9.20]  $K_e = 0,98$

Предварительно принимаем произведение линейной нагрузки на плотность

$$\text{тока [1, рис. 9.27]} \quad AJ_1 = 190 \cdot 10^9 \frac{\text{A}^2}{\text{м}^3}$$

Плотность тока в обмотке статора (предварительно) по (9.25):

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} \quad (3.17)$$

$$J_1 = \frac{190 \cdot 10^9}{35498} = 5,35 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{м}^2} = 5,35 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно)

по (9.24)

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot J_1} \quad (3.18)$$

$$q_{\text{эф}} = \frac{69,99}{2 \cdot 5,35} = 6,54 \text{ мм}^2$$

В машинах с номинальным напряжением до 660 В и мощностью до 100 кВт обмотки выполняют из круглого обмоточного провода и укладывают в трапециевидные полузакрытые пазы.

Выбираем число элементарных проводников  $n_{\text{эл}} = 3$

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} \quad (3.19)$$

$$q_{\text{эл}} = \frac{6,54}{3} = 2,18 \text{ мм}^2$$

Принимаем обмоточный провод марки ПЭТВ [1, ПЗ.1]

При ручной укладке обмоток (двигатели с  $h > 160$  мм) диаметр изолированного провода обычно берут не более 1,7 мм.

Номинальный диаметр неизолированного провода  $d_{\text{эл}} = 1,7$  мм

Средний диаметр изолированного провода  $d_{\text{из}} = 1,785$  мм

Площадь поперечного сечения неизолированного провода  $q_{\text{эл}} = 2,27 \text{ мм}^2$

Окончательное сечение эффективного проводника

$$q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}} \quad (3.20)$$

$$q_{\text{эф}} = 2,27 \cdot 3 = 6,81 \text{ мм}^2$$

Плотность тока в обмотке статора (окончательно) по (9.27)

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} \quad (3.21)$$

$$J_1 = \frac{69,99}{2 \cdot 2,27 \cdot 3} = 5,139 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора определяем по рис. 9.29, а с соотношением размеров, обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов.

Принимаем предварительно по [1, табл. 9.12] при  $2p=4$

Индукция в зубце статора  $B_{z1} = 1,8$  Тл



Индукция в ярме статора  $B_a = 1,55$  Тл

тогда по (9.37) ширина зубца статора

$$b_{z1} = B_\delta \cdot t_{z1} \cdot \frac{\ell_\delta}{B_{z1} \cdot \ell_{ст1} \cdot K_c} \quad (3.22)$$

$$b_{z1} = 0,78 \cdot 0,0158 \cdot \frac{0,17}{1,8 \cdot 0,17 \cdot 0,97} = 7,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 7,1 \text{ мм}$$

где коэффициент заполнения сердечника сталью [1, табл. 9.13] при оксидировании  $K_c = 0,97$

Высота ярма статора по [1, 9.28]

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot \ell_{ст1} \cdot K_c} \quad (3.23)$$

$$h_a = \frac{0,0158}{2 \cdot 1,55 \cdot 0,17 \cdot 0,97} = 0,0309 \text{ м} = 30,9 \text{ мм}$$

Рассчитываем размеры паза в штампе

Нормализованная ширина шлица паза по [1, табл. 9.16]  $b_{ш} = 3,7$  мм

Высота шлица паза при высоте оси вращения двигателя  $h = 200$  мм  $h_{ш} = 1$  мм;  $\beta = 45$  град

Размеры паза по (9.38-9.45)

$$h_{п} = \frac{D_a - D}{2} - h_a \quad (3.24)$$

$$h_{п} = \frac{0,359 - 0,241}{2} - 0,0309 = 0,0281 \text{ м} = 28,1 \text{ мм}$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{ш} - b_{ш}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} \quad (3.25)$$

$$b_1 = \frac{3,14 \cdot (241 + 2 \cdot 1 - 3,7) - 48 \cdot 7,1}{48 - 3,14} = 9,2 \text{ мм}$$

$$b_2 = \pi \cdot \frac{D + 2 \cdot h_{п}}{Z_1} - b_{z1} \quad (3.26)$$

$$b_2 = 3,14 \cdot \frac{241 + 2 \cdot 28,1}{48} - 7,1 = 12,4 \text{ мм}$$

$$h_{п.к} = h_{п} - (h_{ш} + h_{к}) \quad (3.27)$$

$$h_{п.к} = 28,1 - (1 + 2,8) = 24,3 \text{ мм}$$

$$h_k = \frac{b_1 - b_{ш}}{2} \quad (3.28)$$

$$h_k = \frac{9,2 - 3,7}{2} = 2,8 \text{ мм}$$

Размеры паза “в свету” будут меньше, чем в штампе, т.е. чем размеры паза в каждом отдельном листе после штамповки, на величину припусков, указанных в [1, табл. 9.14]  $\Delta b_{\pi} = 0,2 \text{ мм}$ ;  $\Delta h_{\pi} = 0,2 \text{ мм}$

Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_{\pi} \quad (3.29)$$

$$b'_1 = 9,2 - 0,2 = 9 \text{ мм}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta h_{\pi} \quad (3.30)$$

$$b'_2 = 12,4 - 0,2 = 12,2 \text{ мм}$$

$$h'_{\pi,к} = h_{\pi,к} - \Delta h_{\pi} \quad (3.31)$$

$$h'_{\pi,к} = 24,3 - 0,2 = 24,1 \text{ мм}$$

Площадь, занимаемая прокладками в пазу (на дне паза, под клином и между слоями обмотки в двухслойной обмотке)

$$S_{пр} = (0,9 \cdot b_1 + 0,4 \cdot b_2) \quad (3.32)$$

$$S_{пр} = (0,9 \cdot 9,2 + 0,4 \cdot 12,4) = 13,2 \text{ мм}$$

Односторонняя толщина изоляции в пазу по [1, табл. 3.1]  $b_{из} = 0,4 \text{ мм}$

Площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot h_{\pi} + b_1 + b_2) \quad (3.33)$$

$$S_{из} = 0,4 \cdot (2 \cdot 28,1 + 9,2 + 12,4) = 31,1 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки по (9.48)

$$S'_{\pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{\pi,к} - (S_{пр} + S_{из}) \quad (3.34)$$

$$S'_{\pi} = \frac{9 + 12,2}{2} \cdot 24,1 - (13,2 + 31,1) = 211,2 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения паза по (3.2):

$$K_3 = d_{из}^2 \cdot u_{\pi} \cdot \frac{n_{эл}}{S'_{\pi}} \quad (3.35)$$

$$K_3 = 1,785^2 \cdot 16 \cdot \frac{3}{211,2} = 0,72$$

Таким образом, полученное значение допустимо для механизированной укладки обмотки 0,72...0,74.

Расчет фазного ротора

Воздушный зазор по [1, рис. 9.31]  $\delta = 0,7$  мм

Принимаем  $\ell_2 = \ell_1 = 0,15$  м

Для нормальной работы асинхронного двигателя необходимо, чтобы фазная обмотка ротора имела столько же фаз и столько же полюсов, сколько их имеет обмотка статора

Задимся числом пазов на полюс и фазу ротора

$$q_2 = q_1 + 1 \quad (3.36)$$

$$q_2 = 4 + 1 = 5$$

Тогда число пазов ротора

$$Z_2 = Z_1 \cdot \frac{q_2}{q_1} \quad (3.37)$$

$$Z_2 = 48 \cdot \frac{5}{4} = 60$$

Внешний диаметр ротора

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta \quad (3.38)$$

$$D_2 = 241 - 2 \cdot 0,7 = 239,6 \text{ мм} = 0,2396 \text{ м}$$

Зубцовое деление обмотки ротора

$$t_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} \quad (3.39)$$

$$t_{z2} = 3,14 \cdot \frac{0,2396}{60} = 0,0125 \text{ м} = 12,5 \text{ мм}$$

Число витков в фазе по (9.55)

$$w_2 = 2p \cdot q_2 \quad (3.40)$$

$$w_2 = 4 \cdot 5 = 20$$

Напряжение на контактных кольцах ротора при соединении обмотки ротора в звезду по (9.56)

$$U_{к.к.} = \sqrt{3} \cdot U_{1НОМ} \cdot \left(\frac{w_2}{w_1}\right) \quad (3.41)$$

$$U_{к.к.} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot \left(\frac{20}{64}\right) = 119,08 \text{ В}$$

Полученное значение входит в рекомендуемые пределы - 150...250 В

Предварительное значение тока в обмотке фазного ротора по (9.57)

$$I_2 = k_i \cdot I_{1НОМ} \cdot v_i \quad (3.42)$$

$$I_2 = 0,912 \cdot 69,99 \cdot 3,093 = 197,429 \text{ А}$$

где коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания по (9.58)

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\varphi_{НОМ} \quad (3.43)$$

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot 0,89 = 0,912$$

коэффициент приведения токов, для двигателей с фазными роторами

$$v_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_{о61}}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_{о62}} \quad (3.44)$$

$$v_i = \frac{3 \cdot 64 \cdot 0,925}{3 \cdot 20 \cdot 0,957} = 3,093$$

коэффициент распределения обмотки при  $q = 4$  по [1, табл. 3.16]  $k_{p2} =$

$$0,957 ; k_{о62} = k_{p2} = 0,957$$

Сечение эффективных проводников обмотки ротора предварительно по

(9.60)

$$Q_{эф2} = \frac{I_2}{J_2} \quad (3.45)$$

$$Q_{эф2} = \frac{197,429}{5} = 39,49 \text{ мм}^2$$

Плотность тока в обмотке ротора принимаем  $J_2 = 5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$

Ширина паза предварительно по (9.32)

$$b_{п2} = 0.4 \cdot t_{z2} \quad (3.46)$$

$$b_{п2} = 0.4 \cdot 12,5 = 5 \text{ мм}$$

Ширина проводника  $b$  должна быть меньше ширины паза на толщину всей изоляции с учетом допусков, т. е. корпусной, витковой (если она устанавли-

вается в данной конструкции) и проводниковой, а также припусков на сборку сердечников: тогда по (9.35)

$$b'_{эл} = (b_{п2} - 2b_{из} - \Delta b) \quad (3.47)$$

$$b'_{эл} = (5 - 1,7 - 0,2) = 3,1 \text{ мм}$$

где по [1, табл. 3.11]  $2b_{из} = 1,7 \text{ мм}$

по [1, табл. 9.14]  $\Delta b = 0,2 \text{ мм}$

По [1, табл. П 3.2] выбираем неизолированный провод с размерами  $a = 3 \text{ мм}$ ;  $b = 6,3 \text{ мм}$

Расчетное сечение проводника  $q_{эл} = 18,35 \text{ мм}^2$

Окончательное сечение эффективного проводника

$$q_{эф} = q_{эл} \cdot n_{эл} \quad (3.48)$$

$$q_{эф} = 18,35 \cdot 2 = 36,7 \text{ мм}^2$$

Уточняем  $J_2$

$$J_2 = \frac{I_2}{q_{эф}} \quad (3.49)$$

$$J_2 = \frac{197,429}{36,7} = 5,38 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Составляем таблицу заполнения паза ротора

Таблица 3.1-Заполнение паза ротора

Наименование	Размер, мм	
	по ширине паза	по высоте паза
Стержни обмотки — неизолированная медь 3x6,3	3	6,3 x 2 = 12,6
Пазовая изоляция и допуск на укладку	1,7	4
Всего на паз без клина	4,7	16,6

Внутренний диаметр сердечника ротора по (9.102)

$$D_v = k_v \cdot D_a \quad (3.50)$$

$$D_v = 0,23 \cdot 0,359 = 0,08257 \text{ м}$$

где по [1, табл. 9.19] коэффициент  $k_v = 0,23$

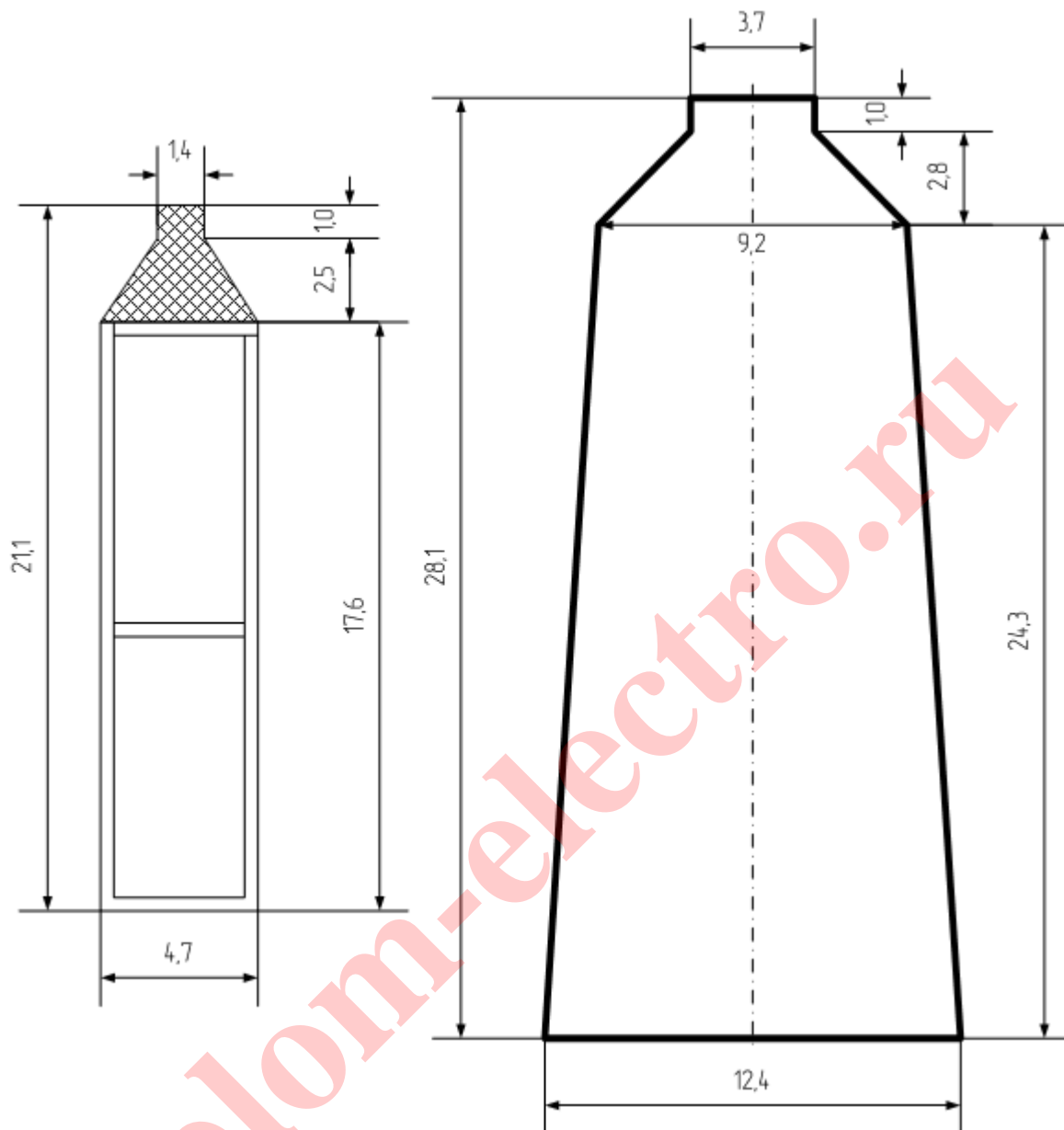


Рисунок 3.1-Пазы статора и ротора спроектированного двигателя

#### 4. Расчет магнитной цепи, потерь и КПД

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2013; толщина листов 0,5 мм.

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{\text{ш}}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{\text{ш}}}{\delta}} \quad (4.1)$$

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{3,7}{0,7}\right)^2}{5 + \frac{3,7}{0,7}} = 2,72$$

по (4.15)

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} \quad (4.2)$$

$$k_{\delta} = \frac{15,8}{15,8 - 2,72 \cdot 0,7} = 1,14$$

Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.103)

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^{-3} \quad (4.3)$$

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,771 \cdot 0,7 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3} = 978,26 \text{ А}$$

Расчетная высота зубца статора  $h_{z1} = h_{\pi} = 0,0281 \text{ м}$

Расчетная индукция в зубцах статора (9.105)

$$B_{sz1} = B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot \frac{\ell_{\delta}}{b_{z1} \cdot \ell_{ст1} \cdot K_c} \quad (4.4)$$

$$B_{sz1} = 0,771 \cdot 15,8 \cdot \frac{0,17}{7,1 \cdot 0,17 \cdot 0,97} = 1,77 \text{ Тл}$$

По [1, П. 1.7] для расчетной индукции  $B_{z1}$  находим  $H_{z1} = 1410 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (9.104)

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} \quad (4.5)$$

$$F_{z1} = 2 \cdot 0,0281 \cdot 1410 = 79,2 \text{ А}$$

Расчетная высота зубца ротора

$$h_{z2} = h_{\pi} - 0,1 \cdot b_2 \quad (4.6)$$

$$h_{z2} = 0,017 - 0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 0,0165 \text{ м} = 16,5 \text{ мм}$$

Расчетная индукция в зубцах ротора (9.109)

$$B'_{z2} = B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot \frac{\ell_{\delta}}{b_{z2} \cdot \ell_{ст2} \cdot K_c} \quad (4.7)$$

$$B'_{z2} = 0,771 \cdot 12,5 \cdot \frac{0,17}{4,7 \cdot 0,17 \cdot 0,97} = 2,11 \text{ Тл}$$

по [1, П. 1.7] для расчетной индукции  $B'_{z2}$  находим  $H_{z2} = 5520 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора по (9.108)

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} \quad (4.8)$$

$$F_{z2} = 2 \cdot 0,0165 \cdot 5520 = 182,2 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны по (9.115)

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} \quad (4.9)$$

$$k_z = 1 + \frac{79,2 + 182,2}{978,26} = 1,27$$

Расчетная высота ярма статора по (9.118)

$$h'_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{\pi} \quad (4.10)$$

$$h'_a = \frac{0,359 - 0,241}{2} - 0,0281 = 0,0309 \text{ м}$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора по (9.119)

$$L_a = \pi \cdot \frac{D_a - h'_a}{2p} \quad (4.11)$$

$$L_a = 3,14 \cdot \frac{0,359 - 0,0309}{4} = 0,2577 \text{ м}$$

Индукция в ярме статора по (9.117)

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_a \cdot \ell_{ст1} \cdot K_c} \quad (4.12)$$

$$B_a = \frac{0,0158}{2 \cdot 0,0309 \cdot 0,17 \cdot 0,97} = 1,55 \text{ Тл}$$

по [1, П.1.6] для расчетной индукции находим  $H_a = 635 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение ярма статора по (9.116)



$$F_a = L_a \cdot H_a \quad (4.13)$$

$$F_a = 0,2577 \cdot 635 = 163,64 \text{ А}$$

Расчетная высота ярма ротора по (9.124)

$$h'_j = \frac{2 + p}{3.2 \cdot p} \cdot \left( \frac{D_2}{2} - h_{\pi} \right) - \frac{2}{3} \cdot m_{k2} \cdot d_{k2} \quad (4.14)$$

$$h'_j = \frac{2 + 2}{3.2 \cdot 2} \cdot \left( \frac{0,24}{2} - 0,017 \right) - \frac{2}{3} \cdot 0 \cdot 0 = 0,0644 \text{ м} = 64,4 \text{ мм}$$

Для всех двигателей, кроме двухполюсных, с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал высота ярма ротора определяется по формуле

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\pi} \quad (4.15)$$

$$h_j = \frac{0,2396 - 0,0826}{2} - 0,017 = 0,0615 \text{ м}$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора по (9.127)

$$L_j = \pi \cdot \frac{D_j + h_j}{2p} \quad (4.16)$$

$$L_j = 3,14 \cdot \frac{0,0826 + 0,0615}{4} = 0,1132 \text{ м}$$

Расчетная индукция в ярме ротора по (9.122)

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot \ell_{ст2} \cdot K_c} \quad (4.17)$$

$$B_j = \frac{0,0158}{2 \cdot 0,0644 \cdot 0,17 \cdot 0,97} = 0,74 \text{ Тл}$$

по [1, П.1.6] находим  $H_j = 110 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение ярма ротора по (9.121)

$$F_j = L_j \cdot H_j \quad (4.18)$$

$$F_j = 0,1132 \cdot 110 = 12,45 \text{ А}$$

Магнитное напряжение на пару полюсов (по 9.128)

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j \quad (4.19)$$

$$F_{\Sigma} = 978,26 + 79,2 + 182,2 + 163,64 + 12,45 = 1415,75 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи по (9.129)

$$k_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{F_{\delta}} \quad (4.20)$$

$$k_{\mu} = \frac{1415,75}{978,26} = 1,45$$

Намагничивающий ток по (9.130)

$$I_{\mu} = p \cdot \frac{F_{\mu}}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{об1}} \quad (4.21)$$

$$I_{\mu} = 2 \cdot \frac{1415,75}{0,9 \cdot 3 \cdot 64 \cdot 0,925} = 17,71 \text{ А}$$

Относительное значение по (9.131)

$$I_{*\mu} = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}} \quad (4.22)$$

$$I_{*\mu} = \frac{17,71}{69,99} = 0,253$$

Параметры рабочего режима

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура  $\nu_{расч} = 115 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Для медных проводников обмотки статора сопротивление

$$\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{41} = 2,439 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока принимаем  $k_R = 1$

Относительное укорочение шага обмотки  $\beta = 0,833$

Средняя ширина катушки по (9.138)

$$b_{кт} = \pi \cdot \frac{D + h_{п}}{2p} \cdot \beta \quad (4.23)$$

$$b_{кт} = 3,14 \cdot \frac{0,241 + 0,0281}{4} \cdot 0,833 = 0,176 \text{ м}$$

Катушки всыпной обмотки статора

Определяем при  $2p = 4$  по [1, табл. 9.23]  $K_L = 1,3$ ;  $K_{выл} = 0,4$ ;  $B = 0,01 \text{ м}$

Длина лобовой части по (9.136)

$$\ell_{л} = K_{л} \cdot b_{КТ} + B \quad (4.24)$$

$$\ell_{л} = 1,3 \cdot 0,176 + 0,01 = 0,2388 \text{ м}$$

Длина вылета лобовой части катушки по (9.137)

$$\ell_{\text{ВЫЛ}} = K_{\text{ВЫЛ}} \cdot b_{КТ} + B \quad (4.25)$$

$$\ell_{\text{ВЫЛ}} = 0,4 \cdot 0,176 + 0,01 = 0,0804 \text{ м}$$

Длина пазовой части равна конструктивной длине сердечников машины  $\ell_{п} =$

$$\ell_{п} = \ell_{1} = 0,17 \text{ м}$$

Средняя длина витка обмотки

$$\ell_{\text{ср}} = 2 \cdot (\ell_{п} + \ell_{л}) \quad (4.26)$$

$$\ell_{\text{ср}} = 2 \cdot (0,17 + 0,2388) = 0,818 \text{ м}$$

Общая длина проводников фазы обмотки статора

$$L_{1} = \ell_{\text{ср}} \cdot w_{1} \quad (4.27)$$

$$L_{1} = 0,818 \cdot 64 = 52,35 \text{ м}$$

Активное сопротивление обмотки статора по (9.132)

$$r_{1} = k_{R} \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_{1}}{q_{\text{ЭФ}} \cdot 10^{-6} \cdot a} \quad (4.28)$$

$$r_{1} = 1 \cdot 2,439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{52,35}{6,81 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,094 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$r_{1*} = r_{1} \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.29)$$

$$r_{1*} = 0,094 \cdot \frac{69,99}{220} = 0,03 \text{ о. е.}$$

Активное сопротивление обмотки ротора по (9.132)

$$r_{2} = K_{R} \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_{2}}{q_{\text{ЭФ}}} \quad (4.30)$$

$$r_{2} = 1 \cdot 2,439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{17,56}{3,67} \cdot 10^{-5} = 0,01167 \text{ Ом}$$

где  $K_{R} = 1$

$$q_{\text{эф}} = q_{\text{эф}} \cdot 10^{-6} \quad (4.31)$$

$$q_{\text{эф}} = 36,7 \cdot 10^{-6} = 3,67 \cdot 10^{-5} \text{ мм}^2$$

удельное сопротивление проводников обмотки

$$\rho_{115} = \left(\frac{1}{41}\right) \cdot 10^{-6} = 2,439 \cdot \frac{10^{-8} \text{ Ом}}{\text{м}}$$

общая длина эффективных проводников фазы обмотки

$$L_2 = w_2 \cdot \ell_{\text{ср}2} \quad (4.32)$$

$$L_2 = 20 \cdot 0,878 = 17,56 \text{ м}$$

где средняя длина витка обмотки ротора

$$\ell_{\text{ср}2} = 2 \cdot (\ell_{\text{п}2} + \ell_{\text{л}2}) \quad (4.33)$$

$$\ell_{\text{ср}2} = 2 \cdot (0,15 + 0,289) = 0,878 \text{ м}$$

где длина пазовой части ротора  $\ell_{\text{п}2} = \ell_2 = 0,15 \text{ м}$

Длина лобовых частей стержня ротора по (9.145)

$$\ell_{\text{л}2} = K_{\text{л}2} \cdot b_{\text{КТ}2} + 2 \cdot B_c \quad (4.34)$$

$$\ell_{\text{л}2} = 1,079 \cdot 0,175 + 2 \cdot 0,05 = 0,289 \text{ м}$$

где по (9.148)

$$m = \frac{b_{\text{СТ}} + S_{\text{СТ}}}{t_{z2}} \quad (4.35)$$

$$m = \frac{3 + 1,7}{12,5} = 0,376$$

где по табл. 9.25  $S_{\text{СТ}} = 1,7 \text{ мм}$ ;  $b_{\text{СТ}} = a = 3 \text{ мм}$

по (9.142)

$$K_{\text{л}2} = \frac{1}{\sqrt{1 - m^2}} \quad (4.36)$$

$$K_{\text{л}2} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,376^2}} = 1,079$$

$$B_c = 0,05 \text{ м}$$

среднее расстояние между сторонами последовательно соединенных стержней по (9.147)

$$b_{\text{КТ2}} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{\text{П2}})}{2p} \quad (4.37)$$

$$b_{\text{КТ2}} = \frac{3,14 \cdot (0,2396 - 0,0166)}{4} = 0,175 \text{ м}$$

Приводим сопротивление ротора к числу витков обмотки статора по (9.150):

$$r'_2 = v_i \cdot r_2 \quad (4.38)$$

$$r'_2 = 3,093 \cdot 0,01167 = 0,036 \text{ Ом}$$

Вылет лобовых частей обмотки ротора по (9.146)

$$\ell_{\text{ВЫЛ}} = K_{\text{ВЫЛ2}} \cdot b_{\text{КТ2}} + B_c \quad (4.39)$$

$$\ell_{\text{ВЫЛ}} = 0,203 \cdot 0,175 + 0,05 = 0,086 \text{ м}$$

где по (9.143)

$$K_{\text{ВЫЛ2}} = 0,5 \cdot K_{\text{Л2}} \cdot m \quad (4.40)$$

$$K_{\text{ВЫЛ2}} = 0,5 \cdot 1,079 \cdot 0,376 = 0,203$$

Относительное значение

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.41)$$

$$r'_{2*} = 0,036 \cdot \frac{69,99}{220} = 0,011 \text{ о. е.}$$

Далее определяем индуктивные сопротивления обмоток

$$K'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) \quad (4.42)$$

$$K'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,833) = 0,875$$

$$K_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot K'_\beta) \quad (4.43)$$

$$K_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,875) = 0,906$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора по табл.

9.26, (см. рис. 9.50, е)

$$\lambda_{\text{П1}} = \frac{h_2}{3 \cdot b_1} \cdot K_\beta + \left( \frac{h_1}{b_1} + 3 \cdot \frac{h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) \cdot K'_\beta \quad (4.44)$$

$$\lambda_{\text{П1}} = \frac{23,5}{3 \cdot 9,2} \cdot 0,906 + \left( \frac{0}{9,2} + 3 \cdot \frac{2,75}{9,2 + 2 \cdot 3,7} + \frac{1}{3,7} \right) \cdot 0,875 = 1,443$$

$$h_2 = h_{\text{П.К}} - 2 \cdot b_{\text{из}} \quad (4.45)$$

$$h_2 = 24,3 - 2 \cdot 0,4 = 23,5 \text{ мм}$$

$$h_k = 0,5 \cdot (b_1 - b_{ш}) \quad (4.46)$$

$$h_k = 0,5 \cdot (9,2 - 3,7) = 2,75 \text{ мм}$$

т.к проводники закреплены пазовой крышкой  $h_1 = 0$  мм

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния статора по (9.159)

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q}{\ell_\delta} \cdot (\ell_l - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (4.47)$$

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{4}{0,15} \cdot (0,2388 - 0,64 \cdot 0,833 \cdot 0,189) = 1,252$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмоток статора по (9.160)

$$\lambda_{д1} = t_{z1} \cdot \frac{10^3}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \varepsilon_1 \quad (4.48)$$

$$\lambda_{д1} = 0,0158 \cdot \frac{10^3}{12 \cdot 0,7 \cdot 1,14} \cdot 0,82 = 1,35$$

При полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов по (9.176)  $k'_{ск} = 0,75$

$$\varepsilon = 2 \cdot k'_{ск} \cdot K_\beta - k_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_{ск}^2) \quad (4.49)$$

$$\varepsilon = 2 \cdot 0,75 \cdot 0,906 - 0,925^2 \cdot \left(\frac{12,5}{15,8}\right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 0,82$$

Расчетная длина магнитопровода для обмотки статора по (9.153)

$$l'_\delta = \ell_1 - 0,5 \cdot n_k \cdot b_k \quad (4.50)$$

$$l'_\delta = 0,17 - 0,5 \cdot 0 \cdot 0,01 = 0,17$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по (9.152)

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) \quad (4.51)$$

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{64}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,17}{2 \cdot 4} \cdot (1,443 + 1,252 + 1,35) = 0,278$$

Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.52)$$

$$x_{1*} = 0,278 \cdot \frac{69,99}{220} = 0,088$$

При расчете номинального режима двигателя во всех формулах

ем  $k_d = 1$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния по табл. 9.26, (см. рис. 9.50, а)

$$\lambda_{п2} = \frac{h_2 - h_0}{3 \cdot b_{п2}} \cdot K_\beta + \frac{h_k}{b_{п2}} \cdot K'_\beta + \frac{h_0}{4 \cdot b_{п2}} \quad (4.53)$$

$$\lambda_{п2} = \frac{14,2 - 1,6}{3 \cdot 4,7} \cdot 1 + \frac{2,5}{4,7} \cdot 1 + \frac{1,6}{4 \cdot 4,7} = 1,511$$

По (9.159) коэффициент лобового рассеяния

$$\lambda_{л2} = 0,34 \cdot \frac{q_2}{\ell_\delta} \cdot (\ell_{л2} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (4.54)$$

$$\lambda_{л2} = 0,34 \cdot \frac{5}{0,17} \cdot (0,289 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,189) = 1,68$$

По (9.160) коэффициент дифференциального рассеяния

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \varepsilon_1 \quad (4.55)$$

$$\lambda_{д2} = \frac{12,5}{12 \cdot 0,7 \cdot 1,14} \cdot 1,625 = 2,121$$

где при целом  $q$  по (9.161)

$$\varepsilon_1 = 2 + 0,022 \cdot q_2^2 - k_{062}^2 \cdot (1 + \Delta z) \quad (4.56)$$

$$\varepsilon_1 = 2 + 0,022 \cdot 5^2 - 0,957^2 \cdot (1 + 0,01) = 1,625$$

$$\Delta z = 0,01$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по (9.177)

$$x_2 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_2}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_\delta}{p \cdot q_2} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) \quad (4.57)$$

$$x_2 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{20}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,17}{2 \cdot 5} \cdot (1,511 + 1,68 + 2,121) = 0,029 \text{ Ом}$$

Приводим сопротивление фазы обмотки ротора к числу витков статора

$$x'_2 = x_2 \cdot v_i \quad (4.58)$$

$$x'_2 = 0,029 \cdot 3,093 = 0,09 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.59)$$

$$x'_{2*} = 0,09 \cdot \frac{69,99}{220} = 0,029$$

Расчет потерь

Потери в стали основные по (9.187)

$$P_{\text{ст.осн}} = \rho_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 \cdot (k_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\text{дз}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (4.60)$$

$$P_{\text{ст.осн}} = 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot (1,6 \cdot 1,55^2 \cdot 40,97 + 1,8 \cdot 1,8^2 \cdot 12,32) = 573,35 \text{ Вт}$$

для стали 2013 по [1,табл. 9.28]  $\rho_{1,0/5,0} = 2,5 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

Удельная масса стали

$$\gamma_{\text{ст}} = 7,8 \cdot 10^3 = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

Масса стали ярма статора по (9.188)

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot K_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad (4.61)$$

$$m_a = 3,14 \cdot (0,359 - 0,0309) \cdot 0,0309 \cdot 0,17 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 40,97 \text{ кг}$$

Масса стали зубцов статора по (9.189)

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot 10^{-3} \cdot Z_1 \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot K_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad (4.62)$$

$$m_{z1} = 0,0281 \cdot 7,1 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 0,17 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 12,32 \text{ кг}$$

Для машин мощностью меньше 250 кВт можно принять  $k_{\text{да}} = 1,6$ ;  $k_{\text{дз}} = 1,8$

Поверхностные потери в роторе по (9.194)

$$P_{\text{пов2}} = \rho_{\text{пов2уд}} \cdot (t_{z2} - b_{\text{ш}}) \cdot Z_2 \cdot \ell_{\text{ст2}} \cdot 10^{-3} \quad (4.63)$$

$$P_{\text{пов2}} = 285,62 \cdot (12,5 - 1,5) \cdot 60 \cdot 0,17 \cdot 10^{-3} = 32,05 \text{ Вт}$$

Удельные поверхностные потери по (9.192)



$$P_{\text{пов2уд}} = 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left( Z_1 \cdot \frac{n_0}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 \quad (4.64)$$

$$P_{\text{пов2уд}} = 0.5 \cdot 1,5 \cdot \left( 48 \cdot \frac{1500}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0,281 \cdot 0,0158 \cdot 10^3)^2 = 285,62 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

В этих выражениях  $k_{01(02)}$  — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора (ротора) на удельные потери, принимаем

$$k_{02} = 1,5$$

Для определения поверхностных потерь вначале находят амплитуду пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора по (9.190)

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad (4.65)$$

$$B_{02} = 0,32 \cdot 1,14 \cdot 0,771 = 0,281 \text{ Тл}$$

Для зубцов ротора определяем отношение  $\frac{b_{\text{ш}}}{\delta} = 5,3$

тогда по [1, рис. 9.53] находим  $\beta_{02} = 0,32$

Пульсационные потери в зубцах ротора по (9.200)

$$P_{\text{пул2}} = 0.11 \cdot \left( Z_1 \cdot \frac{n_0}{1000} \cdot B_{\text{пул2}} \right)^2 \cdot m_{z2} \quad (4.66)$$

$$P_{\text{пул2}} = 0.11 \cdot \left( 48 \cdot \frac{1500}{1000} \cdot 0,161 \right)^2 \cdot 5,98 = 88,4 \text{ Вт}$$

Для определения пульсационных потерь вначале находится амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов по (9.196)

$$B_{\text{пул2}} = \gamma_1 \cdot \frac{\delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B'_{z2} \quad (4.67)$$

$$B_{\text{пул2}} = 2,72 \cdot \frac{0,7}{2 \cdot 12,5} \cdot 2,11 = 0,161 \text{ Тл}$$

Масса стали зубцов ротора по (9.201)

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot 10^{-3} \cdot \ell_{\text{ст2}} \cdot K_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad (4.68)$$

$$m_{z2} = 60 \cdot 0,0165 \cdot 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0,17 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 5,98 \text{ кг}$$

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно малы, так как в пазах таких роторов пульсации индукции в воздушном зазоре над

головками зубцов статора незначительны. Поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не проводят.  $P_{пов1} = 0$  Вт;  $P_{пул1} = 0$  Вт

Суммарные добавочные потери в стали по (9.202)

$$P_{ст.доб} = P_{пов1} + P_{пул1} + P_{пов2} + P_{пул2} \quad (4.69)$$

$$P_{ст.доб} = 0 + 0 + 32,05 + 88,4 = 120,5 \text{ Вт}$$

Полные потери в стали по (9.203)

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} \quad (4.70)$$

$$P_{ст} = 573,35 + 120,5 = 693,9 \text{ Вт}$$

Механические потери по (9.210)

$$P_{мех} = K_T \cdot \left(\frac{n_0}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 \quad (4.71)$$

$$P_{мех} = 0,833 \cdot \left(\frac{1500}{10}\right)^2 \cdot 0,359^4 = 311,3 \text{ Вт}$$

для двигателей с  $2p = 4$

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_a) \quad (4.72)$$

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - 0,359) = 0,833$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно по (9.219)

$$P_{э1хх} = m \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 \quad (4.73)$$

$$P_{э1хх} = 3 \cdot 17,71^2 \cdot 0,094 = 88,4 \text{ Вт}$$

Ток холостого хода двигателя по (9.217)

$$I_{хх} = \sqrt{I_{хха}^2 + I_{ххр}^2} \quad (4.74)$$

$$I_{хх} = \sqrt{1,657^2 + 17,71^2} = 17,787 \text{ А}$$

где активная составляющая тока холостого хода по (9.218)

$$I_{хха} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1хх}}{m \cdot U_{1ном}} \quad (4.75)$$

$$I_{хха} = \frac{693,9 + 311,3 + 88,4}{3 \cdot 220} = 1,657 \text{ А}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода по (9.220)  $I_{ххр} = I_\mu = 17,71 \text{ А}$

Ток холостого хода в относительных единицах

$$I_{xx*} = \frac{I_{xx}}{I_{1ном}} \quad (4.76)$$

$$I_{xx*} = \frac{17,787}{69,99} = 0,25 \text{ о. е.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_{xx} = \frac{I_{xxa}}{I_{xx}} \quad (4.77)$$

$$\cos\varphi_{xx} = \frac{1,657}{17,787} = 0,093 \text{ о. е.}$$

diplom-electro.ru

## 5. Расчет параметров и построение рабочих и пусковых характеристик

Расчет рабочих характеристик

по (9.184)

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.очн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} \quad (5.1)$$

$$r_{12} = \frac{573,35}{3 \cdot 17,71^2} = 0,61 \text{ Ом}$$

$$r_{12*} = r_{12} \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (5.2)$$

$$r_{12*} = 0,61 \cdot \frac{69,99}{220} = 0,19$$

по (9.185)

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{I_{\mu}} - x_1 \quad (5.3)$$

$$x_{12} = \frac{220}{17,71} - 0,278 = 12,14 \text{ Ом}$$

$$x_{12*} = x_{12} \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (5.4)$$

$$x_{12*} = 12,14 \cdot \frac{69,99}{220} = 3,86$$

$$\gamma = \arctg \left( \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})} \right) \quad (5.5)$$

$$\gamma = \arctg \left( \frac{0,094 \cdot 12,14 - 0,61 \cdot 0,278}{0,61 \cdot (0,094 + 0,61) + 12,14 \cdot (0,278 + 12,14)} \right) =$$
$$= 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,37^\circ$$

Т.к  $\gamma < 1^\circ$ , то расчет производим по приближенным формулам

по (9.223)

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} \quad (5.6)$$

$$c_1 = 1 + \frac{0,278}{12,14} = 1,023$$

по (9.227)

$$a' = c_1^2 \quad (5.7)$$

$$a' = 1,023^2 = 1,047$$

$$b' = 0$$

$$a = c_1 \cdot r_1 \quad (5.8)$$

$$a = 1,023 \cdot 0,094 = 0,096$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') \quad (5.9)$$

$$b = 1,023 \cdot (0,278 + 1,023 \cdot 0,09) = 0,379$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} \quad (5.10)$$

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 693,9 + 311,3 = 1005,2 \text{ Вт}$$

Предварительно принимаем номинальное скольжение  $s_{\text{НОМ}} = r_{2*}' = 0,011$

$$P_{2\text{НОМ}} = 37\text{кВт}; U_{1\text{НОМ}} = 220/380 \text{ В}; 2p = 4; I_{1\text{НОМ}} = 69,99 \text{ А}$$

$$I_{2\text{НОМ}}' = 561,85 \text{ А}; x_1 = 0,278 \text{ Ом}; x_2' = 0,09 \text{ Ом}; x_{12\text{П}} = 17,6 \text{ Ом};$$

$$c_{1\text{П}} = 1,02; r_1 = 0,094 \text{ Ом}; r_2' = 0,036 \text{ Ом}; s_{\text{НОМ}} = 0,011.$$

Таблица 5.1-Рабочие характеристики асинхронного двигателя

№ пп	Расчетная формула	Ед.изм	Скольжение, s					s <sub>НОМ</sub>
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	
1	$a' \cdot r_2' / s$	Ом	7,5312	3,7656	2,5104	1,8828	1,5062	3,6208
2	$b' \cdot r_2' / s$	Ом	0,1296	0,0648	0,0432	0,0324	0,0259	0,0623
3	$R = a + a' \cdot r_2' / s$	Ом	7,6232	3,8576	2,6024	1,9748	1,5982	3,7128
4	$X = b + b' \cdot r_2' / s$	Ом	0,5086	0,4438	0,4222	0,4114	0,4049	0,4413
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	7,6401	3,883	2,6364	2,0172	1,6487	3,7389
6	$I_2'' = U_{1H} / Z$	А	28,795	56,657	83,446	109,06	133,44	58,841
7	$\cos \varphi_2' = R / Z$	о.е.	0,9978	0,9934	0,9871	0,979	0,9694	0,993
8	$\sin \varphi_2' = X / Z$	о.е.	0,0666	0,1143	0,1601	0,2039	0,2456	0,118
9	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$	А	30,391	57,945	84,029	108,43	131,01	60,089
10	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$	А	19,627	24,185	31,073	39,953	50,481	24,655
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	36,178	62,79	89,591	115,56	140,4	64,951
12	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	А	29,458	57,96	85,366	111,57	136,5	60,194
13	$P_1 = 3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	20,058	38,244	55,459	71,564	86,466	39,659
14	$P_{\Sigma 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,3691	1,1118	2,2635	3,7656	5,5587	1,1896
15	$P_{\Sigma 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,0937	0,3628	0,787	1,3444	2,0124	0,3913
16	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} (I_1 / I_{1H})^2$	кВт	0,0322	0,097	0,1974	0,3285	0,4849	0,1038
17	$\Sigma P = P_{\text{СТ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{ДОБ}}$	кВт	1,5002	2,5768	4,2531	6,4437	9,0612	2,6899
18	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт	18,558	35,667	51,206	65,12	77,405	<b>36,969</b>
19	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	о.е.	0,925	0,933	0,923	0,910	0,895	0,9322
20	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	о.е.	0,840	0,923	0,938	0,938	0,933	0,9252

По результатам расчетов рабочих характеристик уточняем параметры двигателя  $s_{\text{НОМ}} = 0,0104$  о.е.;  $\eta_{\text{Н}} = 0,93$  о.е.;  $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,93$  о.е.;  $I_{2\text{Н}}' = 60,19$  А;  $I_{1\text{Н}} = 64,95$  А

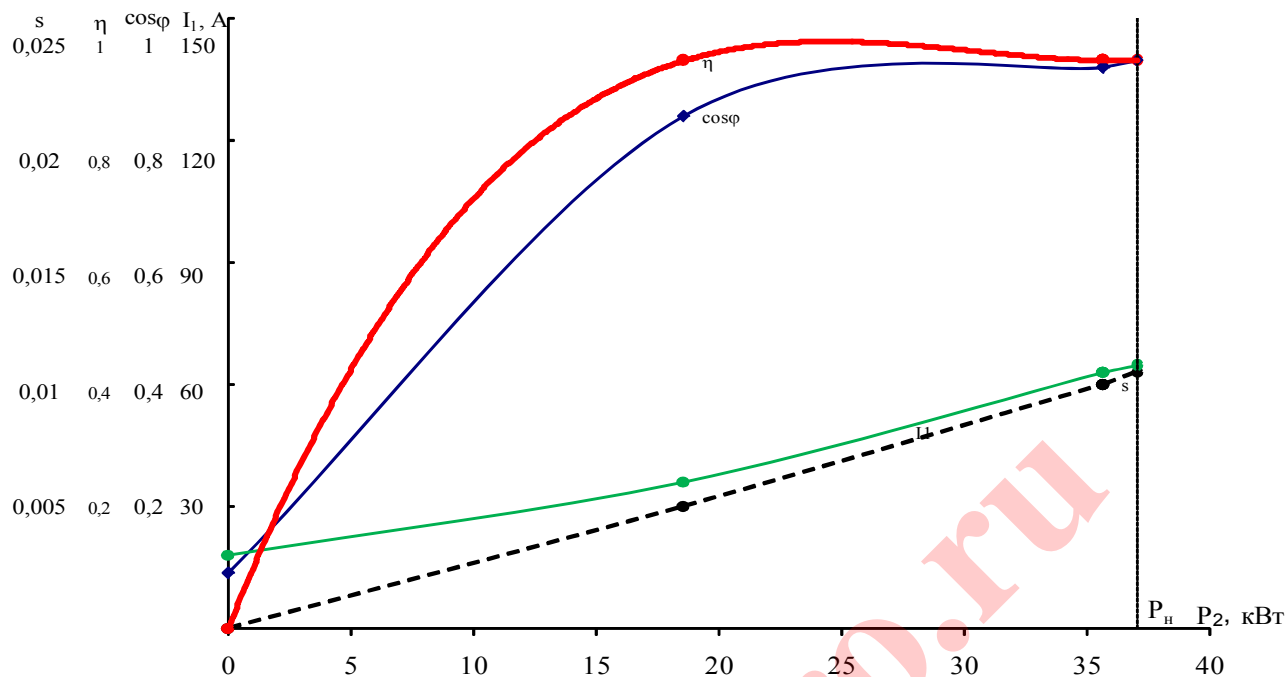


Рисунок 5.1-Рабочие характеристики спроектированного двигателя

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя в именованных и относительных единицах  $r_1 = 0,094 \text{ Ом}$ ;  $r_2' = 0,036 \text{ Ом}$ ;  $x_1 = 0,278 \text{ Ом}$ ;  $x_2' = 0,09 \text{ Ом}$ ;  $r_{1*} = 0,03 \text{ о.е.}$ ;  $r_{2*}' = 0,011 \text{ о.е.}$ ;  $x_{1*} = 0,088 \text{ о.е.}$ ;  $x_{2*}' = 0,029 \text{ о.е.}$ ;  $r_2 = 0,0117 \text{ Ом}$

по (9.184)

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} \quad (5.11)$$

$$r_{12} = \frac{573,35}{3 \cdot 17,71^2} = 0,61 \text{ Ом}$$

$$r_{12*} = r_{12} \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (5.12)$$

$$r_{12*} = 0,61 \cdot \frac{69,99}{220} = 0,19$$

по (9.185)

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{I_{\mu}} - x_1 \quad (5.13)$$

$$x_{12} = \frac{220}{17,71} - 0,278 = 12,14 \text{ Ом}$$

$$x_{12*} = x_{12} \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (5.14)$$

$$x_{12*} = 12,14 \cdot \frac{69,99}{220} = 3,86$$

Расчет производим по приближенным формулам

по (9.223)

$$c_1 = 1 + \frac{\lambda_{п2}}{x_{12}} \quad (5.15)$$

$$c_1 = 1 + \frac{1,482}{12,14} = 1,122$$

Сопrotивления короткого замыкания

$$x_{\text{к}} = x_1 + c_1 \cdot x_2' \quad (5.16)$$

$$x_{\text{к}} = 0,278 + 1,122 \cdot 0,09 = 0,379 \text{ Ом}$$

$$r_{\text{к}} = r_1 + c_1 \cdot r_2' \quad (5.17)$$

$$r_{\text{к}} = 0,094 + 1,122 \cdot 0,036 = 0,134 \text{ Ом}$$

Из расчета рабочих характеристик номинальное скольжение  $s_{\text{НОМ}} = 0,0104$  о. е.

Тогда номинальная частота вращения

$$n_{\text{НОМ}} = n_0 \cdot (1 - s_{\text{НОМ}}) \quad (5.18)$$

$$n_{\text{НОМ}} = 1500 \cdot (1 - 0,0104) = 1484,4 \text{ об/мин}$$

Полезный момент на валу двигателя при номинальной нагрузке определим по формуле

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 \cdot P_{2\text{НОМ}} \cdot \frac{10^3}{n_{\text{НОМ}}} \quad (5.19)$$

$$M_{2\text{НОМ}} = 9,55 \cdot 37 \cdot \frac{10^3}{1484,4} = 238 \text{ Нм}$$

Максимальное значение момента

$$M_{\text{макс}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{НОМ}}^2 \cdot p}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left( r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2} \right)} \quad (5.20)$$



$$M_{\text{макс}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 2}{4 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot (0,094 + \sqrt{0,094^2 + (0,278 + 0,09)^2})} = 975,5 \text{ Нм}$$

Соответствующее этому моменту критическое скольжение

$$s_{\text{кр}} = \frac{r'_2}{x_1 + x'_2} \quad (5.21)$$

$$s_{\text{кр}} = \frac{0,036}{0,278 + 0,09} = 0,0978 \text{ о. е.}$$

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_{\text{п}} = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{ном}}^2 \cdot r'_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot ((r_1 + r'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2)} \quad (5.22)$$

$$M_{\text{п}} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,036 \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot ((0,094 + 0,036)^2 + (0,278 + 0,09)^2)} = 218,5 \text{ Нм}$$

В относительных единицах

$$M_{\text{макс}*} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{2\text{ном}}} \quad (5.23)$$

$$M_{\text{макс}*} = \frac{975,5}{238} = 4,1 \text{ о. е.}$$

$$M_{\text{п}*} = \frac{M_{\text{п}}}{M_{2\text{ном}}} \quad (5.24)$$

$$M_{\text{п}*} = \frac{218,5}{238} = 0,92 \text{ о. е.}$$

Построим механическую характеристику асинхронного двигателя используя формулу

$$M = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{ном}}^2 \cdot r'_2 \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left( (r_1 + \frac{r'_2}{s})^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right)} \quad (5.25)$$

$$M = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,036 \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \left( (0,094 + \frac{0,036}{0,5})^2 + (0,278 + 0,09)^2 \right)} = 408,4$$

Таблица 5.2-Построение естественной механической характеристики

s	0	0,0104	0,0978	0,1	0,2	0,5	0,75	1
M, Нм	0	250,42	975,07	974,33	790,44	408,36	285,18	218,46
M*, о.е.	0	1,000	3,894	3,891	3,156	1,631	1,139	0,872

При расчете механической характеристики следует иметь в виду, что при значениях скольжения, превышающих критическое, точность расчетов резко снижается. Это объясняется изменением параметров схемы замещения асинхронного двигателя, вызванного магнитным насыщением зубцов статора и ротора, и увеличением частоты тока в обмотке ротора.

Форма механических характеристик асинхронного двигателя в значительной степени зависит от величин подведенного к обмотке статора напряжения и активного сопротивления обмотки ротора.

Для повышения пускового момента и ограничения пускового тока в цепь ротора вводится добавочное сопротивление.

Значение добавочного сопротивления при котором пусковой момент будет равен максимальному находится по формуле

$$r_{\text{доб}} = \sqrt{r_1^2 + x_k^2} - r_2' \quad (5.26)$$

$$r_{\text{доб}} = \sqrt{0,094^2 + 0,379^2} - 0,036 = 0,35 \text{ Ом}$$

Тогда пусковой момент асинхронного двигателя

Пусковой момент асинхронного двигателя

$$M_{\text{п}}' = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{ном}}^2 \cdot (r_2' + r_{\text{доб}}) \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot \left( (r_1 + r_2' + r_{\text{доб}})^2 + (x_1 + x_2')^2 \right)} \quad (5.27)$$

$$M_{\text{п}}' = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (0,036 + 0,35) \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot \left( (0,094 + 0,036 + 0,35)^2 + (0,278 + 0,09)^2 \right)} = 975,4 \text{ Нм}$$

$$M_{\text{п}*}' = \frac{M_{\text{п}}'}{M_{2\text{ном}}} \quad (5.28)$$

$$M_{\text{п}*}' = \frac{975,4}{238} = 4,1 \text{ о.е.}$$

Построим механическую характеристику асинхронного двигателя при введении в цепь ротора дополнительном сопротивлении

$$M' = \frac{m_1 \cdot U_{1\text{ном}}^2 \cdot (r_2' + r_{\text{доб}}) \cdot p}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot s \cdot \left( \left( r_1 + \frac{r_2' + r_{\text{доб}}}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right)} \quad (5.29)$$

$$M' = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (0,036 + 0,35) \cdot 2}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5 \cdot \left( \left( 0,094 + \frac{0,036+0,35}{0,5} \right)^2 + (0,278 + 0,09)^2 \right)} = 806$$

Таблица 5.3-Построение искусственной пусковой характеристики

s	0	0,0104	0,0978	0,1	0,2	0,5	0,75	1
M, Нм	0	24,777	221,6	226,26	421,56	806	940,39	975,35
M*, о.е.	0	0,099	0,885	0,904	1,683	3,219	3,755	3,895

Приведенное значение тока в обмотке ротора асинхронного двигателя определяется выражением

Номинальный ток обмотки статора  $I_{1\text{ном}} = 69,99 \text{ А}$

Таблица 5.4-Построение естественной характеристики I(s)

s	0	0,0104	0,0978	0,1	0,2	0,5	0,75	1
I, А	0	5,9	54,2	55,4	106,9	233,8	309,3	363,7
I, о.е.	0	0,084	0,774	0,792	1,527	3,340	4,419	5,196

Таблица 5.5-Построение искусственной характеристики I(s)

s	0	1	3,894	3,891	3,156	1,631	1,139	0,872
I, А	0	563,7	575,6	575,6	574,7	570,1	565,8	561,1
I, о.е.	0	8,054	8,224	8,224	8,211	8,145	8,084	8,017

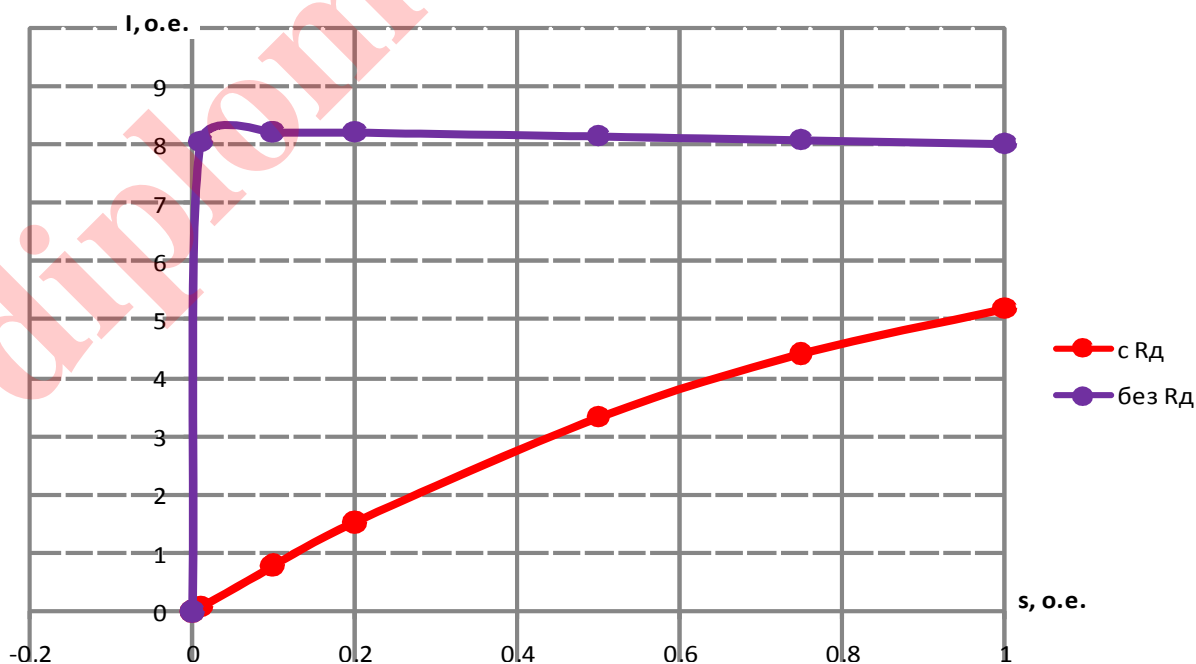


Рисунок 5.2-Пусковые характеристики I=f(s)

Построим также механическую характеристику двигателя в виде функции  $n=f(M)$

Расчет ведем по упрощенной формуле Клосса. Для примера приведем расчет для  $s = 0,5$

$$n = n_0 \cdot (1 - s) \quad (5.30)$$

$$n = 1500 \cdot (1 - 0,5) = 750 \text{ об/мин}$$

$$M = \frac{2 \cdot M_{\text{макс}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}} \quad (5.31)$$

$$M = \frac{2 \cdot 975,5}{\frac{0,5}{0,0978} + \frac{0,0978}{0,5}} = 367,6 \text{ Нм}$$

Таблица 5.6-Построение механической характеристики  $M(n)$

s	0	0,0104	0,0978	0,1	0,2	0,5	0,75	1
n, об/мин	0	1484,4	1353,3	1350,0	1200,0	750,0	375,0	0,0
M, Нм	0	205,1	975,5	975,3	769,9	367,6	250,2	189,0

Определим аналитически сопротивления резисторов на ступенях пускового реостата при кратности максимального момента  $\lambda m = M_{\text{макс}^*} = 4,1$

третьей

$$r_{\text{доб3}} = r_2 \cdot (\lambda m - 1) \quad (5.32)$$

$$r_{\text{доб3}} = 0,0117 \cdot (4,1 - 1) = 0,0363 \text{ Ом}$$

второй

$$r_{\text{доб2}} = r_{\text{доб3}} \cdot \lambda m \quad (5.33)$$

$$r_{\text{доб2}} = 0,0363 \cdot 4,1 = 0,1488 \text{ Ом}$$

первой

$$r_{\text{доб1}} = r_{\text{доб2}} \cdot \lambda m \quad (5.34)$$

$$r_{\text{доб1}} = 0,1488 \cdot 4,1 = 0,6101 \text{ Ом}$$

Тогда сопротивления пускового реостата на его ступенях

$$R_{\text{ПР1}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб1}} + r_{\text{доб3}} \quad (5.35)$$

$$R_{\text{ПР1}} = 0,6101 + 0,1488 + 0,0363 = 0,795 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} \quad (5.36)$$

$$R_{\text{ПР2}} = 0,1488 + 0,0363 = 0,185 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}} = 0,0363 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение при введении сопротивлений в цепь ротора

$$s'_{\text{кр}} = \frac{r'_2 + R_{\text{ПР1}}}{x_1 + x'_2} \quad (5.37)$$

$$s'_{\text{кр}} = \frac{0,036 + 0,795}{0,278 + 0,09} = 2,2582$$

$$s''_{\text{кр}} = \frac{r'_2 + R_{\text{ПР2}}}{x_1 + x'_2} \quad (5.38)$$

$$s''_{\text{кр}} = \frac{0,036 + 0,185}{0,278 + 0,09} = 0,6005$$

Построим искусственные механические характеристики при введении в цепь ротора дополнительного сопротивления

Таблица 5.7-Построение искусственных характеристик  $M(n)$

s	0	0,0104	0,0978	0,1965	0,2	2,2582	0,2000	1
n, об/мин	1500,0	1484,4	1353,3	1205,3	1200,0	#####	1200,0	0,0
$M_{\text{EMX}}$ , Нм	0	205,15	975,5	778,25	769,93	84,337	769,93	189
$M_1$ , Нм	0	8,985	84,337	168,49	171,45	975,5	171,45	722,32
$M_2$ , Нм	0	33,779	309,54	576,67	584,91	484,55	584,91	861,07
$M_3$ , Нм	0	102,97	778,25	975,5	975,35	168,49	975,35	369,12

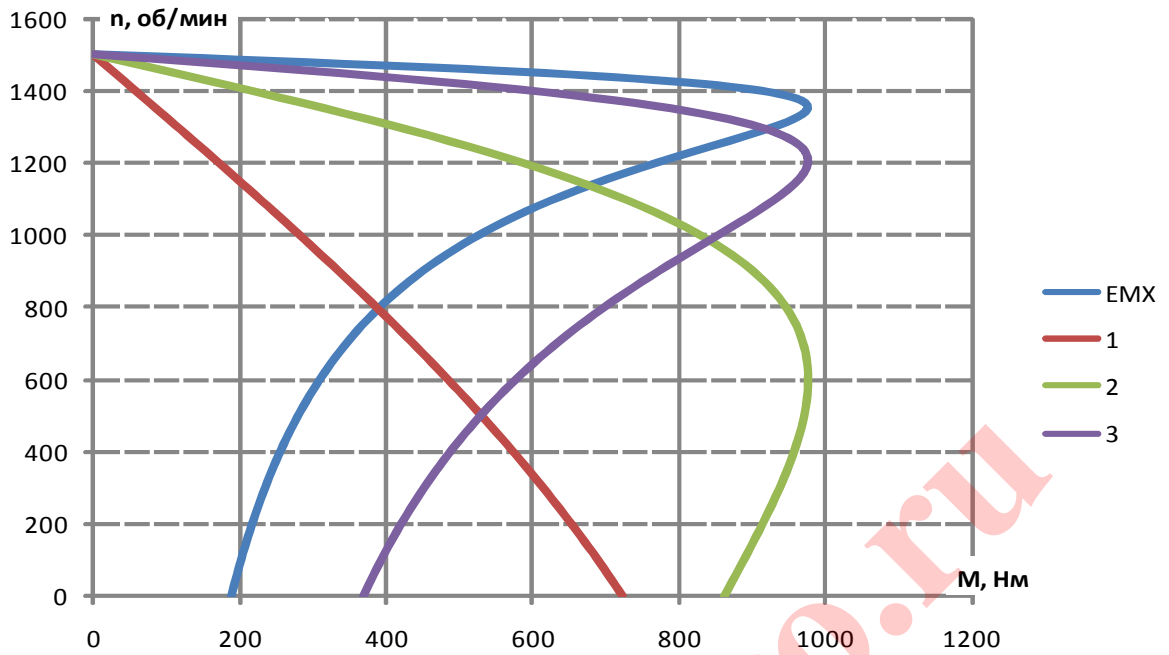


Рисунок 5.3-Пусковые характеристики  $n=f(M)$

Существенно отметить, что при введении дополнительного активного сопротивления в роторную цепь частота вращения двигателя изменяется в относительно широких пределах, а критический момент двигателя при регулировании остается постоянным. Следовательно, перегрузочная способность двигателя при этом не уменьшается.

## 6. Тепловой расчет

Тепловой расчет

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя по (9.315)

$$\Delta u_{\text{пов1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{ЭП}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot \ell_1 \cdot \alpha_1} \quad (6.1)$$

$$\Delta u_{\text{пов1}} = 0,2 \cdot \frac{529,1 + 573,35}{3,14 \cdot 0,241 \cdot 0,17 \cdot 120} = 14,28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где по [1,табл. 9.35]  $K = 0,2$

по (9.313)

$$P'_{\text{ЭП}} = k_p \cdot P_{\text{Э1}} \cdot 2 \cdot \frac{\ell_1}{\ell_{\text{ср}}} \quad (6.2)$$

$$P'_{\text{ЭП}} = 1,07 \cdot 1189,6 \cdot 2 \cdot \frac{0,17}{0,818} = 529,1 \text{ Вт}$$

где из расчета рабочих характеристик находим при номинальном

нии  $P_{\text{Э1}} = 1189,6 \text{ Вт}$

Определяем по [1,рис. 9.67]  $\alpha_1 = 120 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot ^\circ\text{C}$

для обмоток с изоляцией класса нагревостойкости F  $k_p = 1,07$ ;  $\lambda_{\text{ЭКВ}} =$

$$0,16 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора по (9.316)

$$\Delta u_{\text{изп1}} = \frac{P'_{\text{ЭП}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{п1}} \cdot \ell_1} \cdot \left( \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{(b_1 + b_2)}{16 \cdot \lambda''_{\text{ЭКВ}}} \right) \cdot 10^{-3} \quad (6.3)$$

$$\Delta u_{\text{изп1}} = \frac{529,1}{48 \cdot 0,0702 \cdot 0,17} \cdot \left( \frac{0,4}{0,16} + \frac{(9,2 + 12,4)}{16 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 3,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где расчетный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полукрытых трапецидальных пазов

$$\Pi_{\text{п1}} = 2 \cdot h_{\text{п.к}} + b_1 + b_2 \quad (6.4)$$

$$\Pi_{\text{п1}} = 2 \cdot 24,3 + 9,2 + 12,4 = 70,2 \text{ мм} = 0,0702 \text{ м}$$

$$\frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{из}}} = \frac{1,7}{1,785} = 0,95 \quad (6.5)$$

по [1, рис. 9.69] для  $\frac{d}{d_{\text{из}}}$  определяем  $\lambda''_{\text{экв}} = 1,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{°C}$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей по (9.319)

$$\Delta u_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot \ell_{\text{л}}} \cdot \left( \frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{п}}}{12 \cdot \lambda''_{\text{экв}}} \right) \cdot 10^{-3} \quad (6.6)$$

$$\Delta u_{\text{из.л1}} = \frac{743,2}{2 \cdot 48 \cdot 0,0702 \cdot 0,2388} \cdot \left( \frac{0,05}{0,16} + \frac{28,1}{12 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 0,92 \text{ °C}$$

где по (9.314)

$$P'_{\text{эл1}} = k_{\text{р}} \cdot P_{\text{эл1}} \cdot 2 \cdot \frac{\ell_{\text{л}}}{\ell_{\text{ср}}} \quad (6.7)$$

$$P'_{\text{эл1}} = 1,07 \cdot 1189,6 \cdot 2 \cdot \frac{0,2388}{0,818} = 743,2 \text{ Вт}$$

$$b_{\text{из.л1}} = 0,05 \text{ мм}; \quad \Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{п1}} = 0,0702 \text{ м}$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя по (9.320)

$$\Delta u_{\text{пов.п1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \ell_{\text{выл}} \cdot \alpha_1} \quad (6.8)$$

$$\Delta u_{\text{пов.п1}} = \frac{0,2 \cdot 743,2}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,241 \cdot 0,0804 \cdot 120} = 10,17 \text{ °C}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя по (9.321)

$$\Delta u'_{\text{пов.п1}} = \frac{(\Delta u_{\text{пов1}} + \Delta u_{\text{изп1}}) \cdot 2 \cdot \ell_1 + (\Delta u_{\text{из.п1}} + \Delta u_{\text{из.л1}}) \cdot 2 \cdot \ell_{\text{л}}}{\ell_{\text{ср}}} \quad (6.9)$$

$$\Delta u'_{\text{пов.п1}} = \frac{(14,28 + 3,2) \cdot 2 \cdot 0,17 + (3,2 + 0,92) \cdot 2 \cdot 0,2388}{0,818} = 9,67 \text{ °C}$$

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды по (9.322)



$$\Delta u_B = \frac{\Sigma P'_B}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_B} \quad (6.10)$$

$$\Delta u_B = \frac{1638,47}{1,41 \cdot 15,5} = 74,97 \text{ } ^\circ\text{C}$$

по (9.326)

$$\Sigma P'_B = \Sigma P' - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эл}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9 \cdot P_{\text{мех}} \quad (6.11)$$

$$\Sigma P'_B = 2800,6 - (1 - 0,2) \cdot (529,1 + 573,35) - 0,9 \cdot 311,3 = 1638,47 \text{ Вт}$$

где по (9.324)

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) \quad (6.12)$$

$$\Sigma P' = 2689,94 + (1,07 - 1) \cdot (1189,6 + 391,3) = 2800,6 \text{ Вт}$$

из расчета рабочих характеристик при номинальном скольжении

ем  $\Sigma P = 2689,94 \text{ Вт}$

по (9.327)

$$S_{\text{кор}} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (\ell_1 + 2 \cdot \ell_{\text{выл}}) \quad (6.13)$$

$$S_{\text{кор}} = (3,14 \cdot 0,359 + 8 \cdot 0,39) \cdot (0,17 + 2 \cdot 0,0804) = 1,41 \text{ м}^2$$

где по [1, рис. 9.70] для  $h = 200 \text{ мм}$   $\Pi_p = 0,39 \text{ м}$

по [1, рис. 9.67]  $\alpha_B = 15,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot ^\circ\text{C}$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды по (9.328)

$$\Delta u_1 = \Delta u'_{\text{пов.п1}} + \Delta u_B \quad (6.14)$$

$$\Delta u_1 = 9,67 + 74,97 = 84,64 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Проверка условий охлаждения двигателя.

Требуемый для охлаждения расход воздуха по (9.340)

$$Q_B = k_m \cdot \frac{\Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta u_B} \quad (6.15)$$

$$Q_B = 5,8 \cdot \frac{1638,47}{1100 \cdot 74,97} = 0,115 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

где по (9.341)

$$k_m = m' \cdot \sqrt{\frac{n_0}{100} \cdot D_a} \quad (6.16)$$

$$k_m = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1500}{100} \cdot 0,359} = 5,8$$

где коэффициент  $m' = 2,5$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (9.342)

$$Q'_B = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n_0}{100} \quad (6.17)$$

$$Q'_B = 0,6 \cdot 0,359^3 \cdot \frac{1500}{100} = 0,416 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах.

Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

diplom-electro.ru

## Заключение

Параметры спроектированного двигателя отвечают заданным условиям. Двигатель отличается хорошими показателями КПД и коэффициента мощности в нормальном режиме работы. Рассмотрен процесс трехступенчатого реостатного пуска спроектированного двигателя с фазным ротором. Расчеты показывают что введение в пусковую цепь реостата значительно повышает пусковой момент и снижает пусковой ток, что особенно важно в тяжелых условиях пуска.

diplom-electro.ru

#### Список использованных источников

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин. – М.:Энергия, 2002
2. Вольдек А.И. Электрические машины. –М.:Энергия, 1974
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: Учебник для вузов. – М.: Энергия, 1980. – 928 с., ил.
4. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Л.:Энергия, 1973 – 648с, ил.

diplom-electro.ru

# Схема двухслойной концентрической обмотки статора

$$Z = 48; 2p = 4; q = 4; y = 10; a = 2$$

