

Содержание

1. Введение	4
2. Выбор основных размеров двигателя	5
3. Расчет обмоток статора и ротора	7
4. Расчет магнитной цепи, потерь и КПД	18
5. Расчет параметров и построение рабочих и пусковых характеристик	31
6. Тепловой расчет	45
Заключение	47
Список использованных источников	48

1. Введение

Согласно заданию необходимо спроектировать трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью 110 кВт, с частотой вращения 750 об/мин, напряжением 220 / 380 В при частоте 50Гц; ротор – короткозамкнутый, исполнение двигателя по степени защиты IP44 . В качестве базовой модели принята конструкция асинхронного двигателя серии 4А.

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

diplom-electro.ru

2. Выбор основных размеров двигателя

Число пар полюсов определяется по формуле

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

$$p = 60 \cdot \frac{50}{750} = 4$$

Высота оси вращения двигателя согласно задания $h = 315$ мм

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

$$D_a = 0,59 \text{ м}$$

Внутренний диаметр статора

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

$$D = 0,75 \cdot 0,59 = 0,443 \text{ м}$$

где K_D по [1, табл 9.9] $K_D = 0,75$

Полюсное деление

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

$$\tau = 3,14 \cdot \frac{0,443}{8} = 0,174 \text{ м}$$

Расчетная мощность по (9.4)

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

$$P' = 110 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,97}{0,85 \cdot 0,93} = 134977,9 \text{ В} \cdot \text{А}$$

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

$$K_e = 0,97; \cos\varphi_{\text{ном}} = 0,85; \eta_{\text{ном}} = 0,93$$

Электромагнитные нагрузки предварительно по [1, рис. 9.22]

$$A = 42000 \frac{\text{А}}{\text{м}}; B_\delta = 0,82 \text{ Тл}$$

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

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

$$\Omega = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{750}{60} = 78,5 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Расчетная длина магнитопровода по (9.6)

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

$$\ell_\delta = \frac{134977,9}{1,11 \cdot 0,443^2 \cdot 78,5 \cdot 0,92 \cdot 42000 \cdot 0,82} = 0,25 \text{ м}$$

В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250...300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции $\ell_{ст1} = \ell_\delta = 0,25 \text{ м}$

Конструктивная длина сердечника статора $\ell_1 = \ell_{ст1} = 0,25 \text{ м}$

Проверка правильности выбора размеров двигателя

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

$$\lambda = \frac{0,25}{0,174} = 1,44$$

Значение λ находится в допустимых пределах [1,рис. 9.25].

3. Расчет обмоток статора и ротора

По [1, табл. 9.11] зубцовое деление при прямоугольных полуоткрытых пазах статора

$$t_{z1\max} = 0,022 \text{ м}; \quad t_{z1\min} = 0,017 \text{ м}$$

Число пазов статора по (9.16)

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

$$Z_{1\min} = 3,14 \cdot \frac{0,443}{0,022} = 63$$

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

$$Z_{1\max} = 3,14 \cdot \frac{0,443}{0,017} = 82$$

Принимаем по [1, табл. 9.18] $Z_1 = 72$

тогда

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

$$q = \frac{72}{8 \cdot 3} = 3$$

где число фаз $m = 3$

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

Зубцовое деление статора (окончательно)

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

$$t_{z1} = 3,14 \cdot \frac{0,443}{8 \cdot 3 \cdot 3} = 0,0193 \text{ м} = 19,3 \text{ мм}$$

Номинальный ток обмотки статора (по 9.18)

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

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{110 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,85 \cdot 0,93} = 210,84 \text{ А}$$

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

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

$$u'_\pi = 3,14 \cdot 0,443 \cdot \frac{42000}{210,84 \cdot 72} = 3,9 \text{ шт}$$

Принимаем число параллельных ветвей $a = 4$ шт

тогда по (9.19)

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

$$u_\pi = 4 \cdot 3,9 = 15,6 \text{ шт принимаем } 16 \text{ шт}$$

Окончательные значения:

число витков в фазе по (9.20)

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

$$w_1 = 16 \cdot \frac{72}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 48 \text{ шт}$$

линейная нагрузка по (9.21)

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

$$A = 2 \cdot 210,84 \cdot 48 \cdot \frac{3}{3,14 \cdot 0,443} = 43631 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

магнитный поток по (9.22)

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

$$\Phi = 0,97 \cdot \frac{220}{4 \cdot 1,11 \cdot 48 \cdot 0,96 \cdot 50} = 0,0209 \text{ Вб}$$

индукция в магнитном зазоре

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

$$B_\delta = 4 \cdot \frac{0,0209}{0,443 \cdot 0,25} = 0,755 \text{ Тл}$$

где при $q = 3$ по [1, табл. 3.16]

$$K_{p1} = 0,96$$

Расчетный шаг по [1, (3.9)]

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

$$y_{расч} = 2 \cdot (3 + 1) = 8$$

Принимаем шаг обмотки $y = 8$

Укорочение шага [1, 3.12]

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

$$\beta = \frac{8}{9} = 0,889$$

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

$$\tau_1 = \frac{72}{8} = 9$$

Коэффициент укорочения (3.6)

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

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{3,14}{2} \cdot 0,889\right) = 0,985$$

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

$$K_{об1} = 0,96 \cdot 0,985 = 0,946$$

для $D_a = 0,272$ м по [1, рис. 9.20] $K_e = 0,97$

Предварительно принимаем произведение линейной нагрузки на плотность

$$\text{тока [1, рис. 9.27]} \quad AJ_1 = 170 \cdot 10^9 \frac{\text{A}^2}{\text{м}^3}$$

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

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

$$J_1 = \frac{170 \cdot 10^9}{43631} = 3,9 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{м}^2} = 3,9 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно)

по (9.24)

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

$$q_{\text{эф}} = \frac{210,84}{4 \cdot 3,9} = 13,52 \text{ мм}^2$$

В машинах мощностью более 100 кВт для придания катушкам большей механической прочности их выполняют из прямоугольного провода и укладывают в пазы с параллельными стенками.

Выбираем число элементарных проводников $n_{\text{эл}} = 2$

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

$$q_{\text{эл}} = \frac{13,52}{2} = 6,76 \text{ мм}^2$$

Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Обмотка из прямоугольного провода укладывается в прямоугольные пазы (рис. 9.28). Боковые стенки таких пазов параллельны, поэтому зубцы статора имеют трапециевидальное сечение, и индукция в них неравномерна.

Принимаем предварительно по [1, табл. 9.12] при $2p=8$

Индукция в зубце статора $B_{z\text{max}} = B_{z1} = 1,65 \text{ Тл}$

Индукция в ярме статора $B_a = 1,15 \text{ Тл}$

где коэффициент заполнения сердечника сталью [1, табл. 9.13] при

$h=315 \text{ Кс} = 0,95$

тогда минимальная ширина зубца по (9.29)

$$b_{z1\text{min}} = B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot \frac{\ell_{\delta}}{B_{z\text{max}} \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot K_c} \quad (3.20)$$

$$b_{z1\text{min}} = 0,755 \cdot 0,0193 \cdot \frac{0,25}{1,65 \cdot 0,25 \cdot 0,95} = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Ширина паза предварительно по (9.32)

$$b_{\text{п}} = t_{z1} - b_{z1\text{min}} \quad (3.21)$$

$$b_{\text{п}} = 0,0193 - 9,3 \cdot 10^{-3} = 0,01 \text{ м} = 10 \text{ мм}$$

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)

$$b'_{эл} = 0.5 \cdot (b_{п} - 2 \cdot b_{из} - \Delta b) \quad (3.22)$$

$$b'_{эл} = 0.5 \cdot (10 - 2 \cdot 1,1 - 0,3) = 3,75 \text{ мм}$$

где по [1,табл. 3.9] $b_{из} = 1,1 \text{ мм}$

по [1,табл. 9.14] $\Delta b = 0,3 \text{ мм}$; $\Delta h = 0,3 \text{ мм}$

По [1, П 3.2] выбираем провод прямоугольного сечения ПЭТП

$$1 \times \frac{0,8 \times 2}{0,92 \times 2,12}$$

Расчетное сечение проволоки $q_{эл} = 6,387 \text{ мм}^2$

Окончательное сечение эффективного проводника

$$q_{эф} = q_{эл} \cdot n_{эл} \quad (3.23)$$

$$q_{эф} = 6,387 \cdot 2 = 12,774 \text{ мм}^2$$

Ориентируясь на [1,табл. 3.9], составляем таблицу заполнения паза статора.

Размеры паза в штампе [1,рис. 9.76, а] принимаем с учетом припусков [1, табл. 9.14]

Таблица 3.1-Заполнение паза статора

Наименование	Размер, мм	
	по ширине паза	по высоте паза
Обмоточный провод изолированный 1,92x3,87	3,87·1=3,9	1,92·16=30,7
Пазовая изоляция и допуск на укладку	2,2	4,5
Всего на паз без клина	6,1	35,2
Припуск	0,3	0,3
Всего на паз с учетом припусков	6,4	35,5

Ширина шлица паза выбирается из условия обеспечения свободной укладки полукатушек в паз

$$b_{\text{ш}} = 0.5 \cdot b_{\text{п}} + 1 \quad (3.24)$$

$$b_{\text{ш}} = 0.5 \cdot 6,4 + 1 = 4,2 \text{ мм}$$

Высоту шлица и высоту клиновой части паза выполняют в пределах

$$h_{\text{ш}} = 0,6 \dots 0,8 \text{ мм и } h_{\text{к}} = 2,5 \dots 3,5 \text{ мм принимаем } h_{\text{ш}} = 0,8 \text{ мм; } h_{\text{к}} = 3 \text{ мм}$$

Окончательное сечение эффективного проводника

$$q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}} \quad (3.25)$$

$$q_{\text{эф}} = 6,387 \cdot 2 = 12,774 \text{ мм}^2$$

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

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} \quad (3.26)$$

$$J_1 = \frac{210,84}{4 \cdot 6,387 \cdot 2} = 4,126 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Расчет ротора

$$\text{Воздушный зазор по [1,рис. 9.31]} \quad \delta = 1,3 \text{ мм}$$

$$\text{Число пазов ротора по [1,табл. 9.18]} \quad Z_2 = 56$$

$$\text{пазы ротора выполняем без скоса } \beta_{\text{ск}} = 0; \quad k_{\text{ск}} = 1$$

Внешний диаметр ротора

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta \quad (3.27)$$

$$D_2 = 443 - 2 \cdot 1,3 = 440,4 \text{ мм} = 0,4404 \text{ м}$$

$$\text{Длина магнитопровода ротора } \ell_{\text{ст2}} = \ell_{\text{ст1}} = 0,25 \text{ м}$$

Зубцовое деление ротора

$$t_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} \quad (3.28)$$

$$t_{z2} = 3,14 \cdot \frac{440,4}{56} = 24,7 \text{ мм} = 0,0247 \text{ м}$$

В двигателях с высотой оси вращения более 250 мм сердечники крепят на валу с помощью шпонки. Тогда по (9.102) внутренний диаметр сердечника ротора :

$$D_j = D_B = 0,1357 \text{ м}$$

$$D_B = k_B \cdot D_a \quad (3.29)$$

$$D_B = 0,23 \cdot 0,59 = 0,1357 \text{ м}$$

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

В большинстве двигателей с высотой оси вращения $h > 250$ мм выполняют аксиальные каналы в целях некоторого улучшения условий охлаждения ротора и снижения его массы и момента инерции. Принимаем расположение каналов в один ряд $m_{k2} = 1$ шт

Принимаем 12 аксиальных каналов с диаметром $d_{k2} = 0,03$ м

по (9.58)

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\varphi_{\text{НОМ}} \quad (3.30)$$

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot 0,85 = 0,88$$

по (9.66)

$$v_i = 2 \cdot m \cdot w_1 \cdot \frac{K_{\text{об1}}}{Z_2 \cdot k_{\text{СК}}} \quad (3.31)$$

$$v_i = 2 \cdot 3 \cdot 48 \cdot \frac{0,946}{56 \cdot 1} = 4,87$$

Ток в обмотке ротора по (9.57)

$$I_2 = k_i \cdot I_{1\text{НОМ}} \cdot v_i \quad (3.32)$$

$$I_2 = 0,88 \cdot 210,84 \cdot 4,87 = 903,58 \text{ А}$$

Плотность тока в стержне литой клетки принимаем $J_2 = 2,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) по (9.68)

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} \quad (3.33)$$

$$q_c = \frac{903,58}{2,5} = 361,4 \text{ мм}^2$$

Принимаем трапецеидальные закрытые пазы [1, рис. 9.40, б] с размерами шлица паза

$$b_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}; h_{\text{ш}} = 0,7 \text{ мм}; h'_{\text{ш}} = 0,3 \text{ мм}$$

Принимаем допустимую индукцию в зубцах ротора по [1, табл. 9.12]

$$B_{z2} = 1,9 \text{ Тл}$$

Допустимая ширина зубца по (9.75)

$$b_{z2\text{доп}} = B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot \frac{\ell_{\delta}}{B_{z2} \cdot \ell_{\text{ст}2} \cdot K_c} \quad (3.34)$$

$$b_{z2\text{доп}} = 0,755 \cdot 24,7 \cdot \frac{0,25}{1,9 \cdot 0,25 \cdot 0,97} = 10,12 \text{ мм}$$

принимаем $b_{z2} = b_{z2\text{доп}} = 10,1 \text{ мм}$

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

Определяем размеры грушевидного паза ротора по [1, 9.76-9.78]

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{\text{ш}} - 2 \cdot h'_{\text{ш}}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} \quad (3.35)$$

$$b_1 = \frac{3,14 \cdot (440,4 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 56 \cdot 10,1}{3,14 + 56} = 13,7 \text{ мм}$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} \quad (3.36)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{13,7^2 \cdot \left(\frac{56}{3,14} + \frac{3,14}{2}\right) - 4 \cdot 361,4}{\frac{56}{3,14} + \frac{3,14}{2}}} = 10,6 \text{ мм}$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} \quad (3.37)$$

$$h_1 = (13,7 - 10,6) \cdot \frac{56}{2 \cdot 3,14} = 27,6 \text{ мм}$$

Полная высота паза ротора

$$h_{\text{п}} = \frac{b_1 + b_2}{2} + h_1 + h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}} \quad (3.38)$$

$$h_{\text{п}} = \frac{13,7 + 10,6}{2} + 27,6 + 0,7 + 0,3 = 40,8 \text{ мм}$$

Уточняем ширину зубцов ротора по формулам [1, табл. 9.20]

$$b'_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot (h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}}) \cdot b_1}{Z_2} - b_1 \quad (3.39)$$

$$b'_{z2} = 3,14 \cdot \frac{440,4 - 2 \cdot (0,7 + 0,3) \cdot 13,7}{56} - 13,7 = 10,1 \text{ мм}$$

$$b''_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{\pi} + b_2}{Z_2} - b_2 \quad (3.40)$$

$$b''_{z2} = 3,14 \cdot \frac{440,4 - 2 \cdot 40,8 + 10,6}{56} - 10,6 = 10,1 \text{ мм}$$

$$b_{z2} = b'_{z2} = b''_{z2} = 10,1 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения стержня по (9.79)

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 \quad (3.41)$$

$$q_c = \frac{3,14}{8} \cdot (13,7^2 + 10,6^2) + \frac{1}{2} \cdot (13,7 + 10,6) \cdot 27,6 = 453,2 \text{ мм}^2$$

Плотность тока в стержне

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} \quad (3.42)$$

$$J_2 = \frac{903,58}{453,2} = 1,99 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Плотность тока в стержне определяем по (9.70) и (9.71)

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad (3.43)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(3,14 \cdot \frac{4}{56}\right) = 0,445$$

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{\Delta} \quad (3.44)$$

$$I_{\text{кл}} = \frac{903,58}{0,445} = 2030,52 \text{ А}$$

Плотность тока в замыкающих кольцах

$$J_{\text{кл}} = 0,85 \cdot J_2 \quad (3.45)$$

$$J_{\text{кл}} = 0,85 \cdot 1,99 = 1,69 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

Замыкающие кольца литой обмотки обычно выполняют с поперечным сечением в виде неправильной трапеции, прилегающей своим большим основанием к торцу ротора.

Площадь поперечного сечения кольца по (9.72)

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} \quad (3.46)$$

$$q_{\text{кл}} = \frac{2030,52}{1,69} = 1201,5 \text{ мм}^2$$

Размеры короткозамыкающих колец:

$$h_{\text{кл}} = 1.25 \cdot h_{\text{п}} \quad (3.47)$$

$$h_{\text{кл}} = 1.25 \cdot 40,8 = 51 \text{ мм}$$

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}} \quad (3.48)$$

$$b_{\text{кл}} = \frac{1201,5}{51} = 24 \text{ мм}$$

$$q_{\text{кл}} = h_{\text{кл}} \cdot b_{\text{кл}} \quad (3.49)$$

$$q_{\text{кл}} = 51 \cdot 24 = 1224 \text{ мм}^2$$

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} \quad (3.50)$$

$$D_{\text{кл.ср}} = 440,4 - 51 = 389 \text{ мм}$$

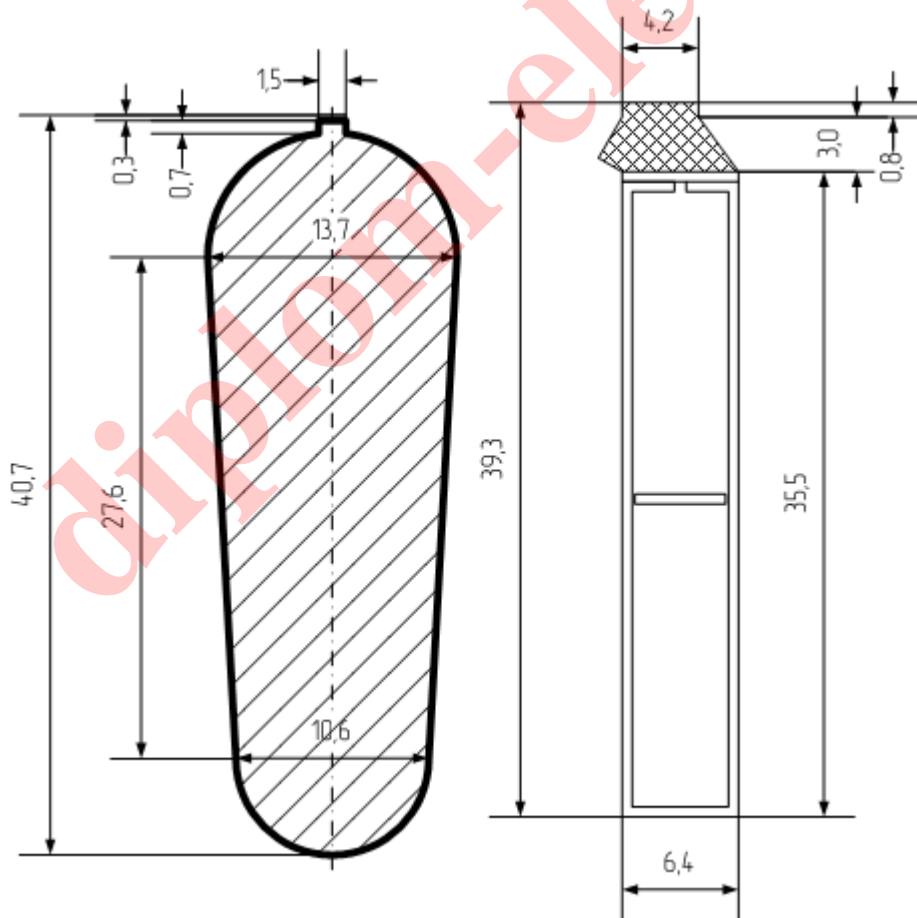


Рисунок 3.1-Пазы статора и ротора спроектированного двигателя

4. Расчет магнитной цепи, потерь и КПД

Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2314; толщина листов 0,5 мм.

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

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{4}{1,3}\right)^2}{5 + \frac{4}{1,3}} = 1,17$$

по (4.15)

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

$$k_{\delta} = \frac{19,3}{19,3 - 1,17 \cdot 1,3} = 1,09$$

Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.103)

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

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,755 \cdot 1,3 \cdot 1,09 \cdot 10^{-3} = 1701,04 \text{ А}$$

Расчетная высота зубца статора $h_{z1} = h_{\text{п}} = 0,0352 \text{ м}$

Расчетная индукция в зубцах статора (9.105)

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

$$B_{sz1} = 0,755 \cdot 19,3 \cdot \frac{0,25}{10,1 \cdot 0,25 \cdot 0,95} = 1,52 \text{ Тл}$$

По [1, П. 1.7] для расчетной индукции B_{z1} находим $H_{z1} = 1000 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (9.104)

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

$$F_{z1} = 2 \cdot 0,0352 \cdot 1000 = 70,4 \text{ А}$$

Расчетная высота зубца ротора

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

$$h_{z2} = 0,041 - 0,1 \cdot 0,011 = 0,0399 \text{ м} = 39,9 \text{ мм}$$

Расчетная индукция в зубцах ротора (9.109)

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

$$B'_{z2} = 0,755 \cdot 24,7 \cdot \frac{0,25}{10,1 \cdot 0,25 \cdot 0,97} = 1,9 \text{ Тл}$$

по [1, П. 1.7] для расчетной индукции B'_{z2} находим $H_{z2} = 5220 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора по (9.108)

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

$$F_{z2} = 2 \cdot 0,0399 \cdot 5220 = 416,6 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны по (9.115)

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

$$k_z = 1 + \frac{70,4 + 416,6}{1701,04} = 1,29$$

Расчетная высота ярма статора по (9.118)

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

$$h'_a = \frac{0,59 - 0,443}{2} - 0,0352 = 0,0383 \text{ м}$$

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

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

$$L_a = 3,14 \cdot \frac{0,59 - 0,0383}{8} = 0,2167 \text{ м}$$

Индукция в ярме статора по (9.117)

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

$$B_a = \frac{0,0209}{2 \cdot 0,0383 \cdot 0,25 \cdot 0,95} = 1,15 \text{ Тл}$$

по [1, П.1.6] для расчетной индукции находим $H_a = 540 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение ярма статора по (9.116)

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

$$F_a = 0,2167 \cdot 540 = 117,02 \text{ A}$$

Расчетная высота ярма ротора по (9.124)

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

$$h'_j = \frac{2 + 4}{3.2 \cdot 4} \cdot \left(\frac{0,44}{2} - 0,041 \right) - \frac{2}{3} \cdot 1 \cdot 0,03 = 0,0639 \text{ м} = 63,9 \text{ мм}$$

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

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

$$h_j = \frac{0,4404 - 0,1357}{2} - 0,041 = 0,1114 \text{ м}$$

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

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

$$L_j = 3,14 \cdot \frac{0,1357 + 0,1114}{8} = 0,097 \text{ м}$$

Расчетная индукция в ярме ротора по (9.122)

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

$$B_j = \frac{0,0209}{2 \cdot 0,0639 \cdot 0,25 \cdot 0,97} = 0,67 \text{ Тл}$$

по [1, П.1.6] находим $H_j = 235 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение ярма ротора по (9.121)

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

$$F_j = 0,097 \cdot 235 = 22,8 \text{ A}$$

Магнитное напряжение на пару полюсов (по 9.128)

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

$$F_{\Sigma} = 1701,04 + 70,4 + 416,6 + 117,02 + 22,8 = 2327,86 \text{ A}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи по (9.129)

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

$$k_{\mu} = \frac{2327,86}{1701,04} = 1,37$$

Намагничивающий ток по (9.130)

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

$$I_{\mu} = 4 \cdot \frac{2327,86}{0,9 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 0,946} = 75,95 \text{ А}$$

Относительное значение по (9.131)

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

$$I_{*\mu} = \frac{75,95}{210,84} = 0,36$$

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 $\beta = 0,889$

Средняя ширина катушки по (9.138)

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

$$b_{кт} = 3,14 \cdot \frac{0,443 + 0,0352}{8} \cdot 0,889 = 0,167 \text{ м}$$

Катушки из прямоугольного провода

длина лобовой части витка

$$m = \frac{b + S}{t_{z1}} \quad (4.24)$$

$$m = \frac{0,025 + 3,5 \cdot 10^{-3}}{0,0193} = 1,477 \text{ м}$$

ширина меди катушки в лобовой части $b = 0,025 \text{ м}$

Допустимое расстояние между медью проводников соседних катушек по [1, табл. 9.24] $S = 0,0065 = 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Зубцовое деление статора $t_{z1} = 0,0193 \text{ м}$

По выражениям (9.142)-(9.143) определяем

$$K_L = 1 \quad (4.25)$$

$$K_{\text{ВЫЛ}} = 0,5 \cdot K_L \cdot m \quad (4.26)$$

$$K_{\text{ВЫЛ}} = 0,5 \cdot 1 \cdot 1,477 = 0,7385$$

Вылет прямолинейной части катушек из паза по [1, табл. 9.24] $B = 0,04 \text{ м}$

Длина лобовой части по (9.139)

$$\ell_L = K_L \cdot b_{\text{КТ}} + 2 \cdot B + h_{\text{П}} \quad (4.27)$$

$$\ell_L = 1 \cdot 0,167 + 2 \cdot 0,04 + 0,0352 = 0,282 \text{ м}$$

Длина вылета лобовой части катушки по (9.140)

$$\ell_{\text{ВЫЛ}} = K_{\text{ВЫЛ}} \cdot b_{\text{КТ}} + B + 0,5 \cdot h_{\text{П}} \quad (4.28)$$

$$\ell_{\text{ВЫЛ}} = 0,7385 \cdot 0,167 + 0,04 + 0,5 \cdot 0,0352 = 0,181 \text{ м}$$

Длина пазовой части равна конструктивной длине сердечников машины $\ell_{\text{П}} = \ell_1 = 0,25 \text{ м}$

Средняя длина витка обмотки

$$\ell_{\text{СР}} = 2 \cdot (\ell_{\text{П}} + \ell_L) \quad (4.29)$$

$$\ell_{\text{СР}} = 2 \cdot (0,25 + 0,282) = 1,064 \text{ м}$$

Общая длина проводников фазы обмотки статора

$$L_1 = \ell_{\text{СР}} \cdot w_1 \quad (4.30)$$

$$L_1 = 1,064 \cdot 48 = 51,07 \text{ м}$$

Активное сопротивление обмотки статора по (9.132)

$$r_1 = k_R \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot 10^{-6} \cdot a} \quad (4.31)$$

$$r_1 = 1 \cdot 2,439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{51,07}{12,774 \cdot 10^{-6} \cdot 4} = 0,024 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.32)$$

$$r_{1*} = 0,024 \cdot \frac{210,84}{220} = 0,023 \text{ о. е.}$$

Для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} = 4,878 \cdot \frac{10^{-8} \text{ Ом}}{\text{м}}$

Сопротивление стержня по (9.169)

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{\ell_{\text{ст2}}}{q_c \cdot 10^{-6}} \quad (4.33)$$

$$r_c = 4,878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,25}{453,2 \cdot 10^{-6}} = 2,691 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями

$$r_{\text{кл}} = \rho_{115} \cdot \pi \cdot D_{\text{кл.ср}} \cdot \frac{10^{-3}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}} \cdot 10^{-6}} \quad (4.34)$$

$$r_{\text{кл}} = 4,878 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 389 \cdot \frac{10^{-3}}{56 \cdot 1224 \cdot 10^{-6}} = 8,697 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора по (9.168)

$$r_2 = r_c + 2 \cdot \frac{r_{\text{кл}}}{\Delta^2} \quad (4.35)$$

$$r_2 = 2,691 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 8,697 \cdot \frac{10^{-7}}{0,445^2} = 3,569 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad (4.36)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(3,14 \cdot \frac{4}{56}\right) = 0,445$$

Приводим сопротивление ротора к числу витков обмотки статора по (9.172),

(9.173):

$$r'_2 = r_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(w_1 \cdot k_{061})^2}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}^2} \quad (4.37)$$

$$r'_2 = 3,569 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(48 \cdot 0,946)^2}{56 \cdot 1^2} = 0,016 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.38)$$

$$r'_{2*} = 0,016 \cdot \frac{210,84}{220} = 0,015 \text{ о. е.}$$

Далее определяем индуктивные сопротивления обмоток

$$K'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) \quad (4.39)$$

$$K'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,889) = 0,917$$

$$K_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot K'_\beta) \quad (4.40)$$

$$K_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,917) = 0,938$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора по табл.

9.26, (см. рис. 9.50, б)

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_2 - h_0}{3 \cdot b_{\text{п}}} \cdot K_\beta + \left(\frac{h_1}{b_{\text{п}}} + 3 \cdot \frac{h_{\text{к}}}{b_{\text{п}} + 2 \cdot b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) \cdot K'_\beta + \frac{h_0}{4 \cdot b_{\text{п}}} \quad (4.41)$$

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{34,1 - 1,4}{3 \cdot 6,4} \cdot 0,938 + \left(\frac{0,9}{6,4} + 3 \cdot \frac{3}{6,4 + 2 \cdot 4,2} + \frac{0,8}{4,2} \right) \cdot 0,917 + \frac{1,4}{4 \cdot 6,4} =$$

$$= 2,513$$

$$h_0 = 1 + \frac{0,2 + 0,6}{2} = 1,4 \text{ мм}; \quad h_{\text{к}} = 3 \text{ мм}$$

$$h_1 = 0,5 + \frac{0,2 + 0,6}{2} = 0,9 \text{ мм}$$

$$h_2 = b_{\text{п}} - 2 \cdot 0,7 \quad (4.42)$$

$$h_2 = 35,5 - 2 \cdot 0,7 = 34,1 \text{ мм}$$

$$b_{\text{п}} = 6,4 \text{ мм}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния статора по

(9.159)

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{q}{\ell_{\delta}} \cdot (\ell_{л} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (4.43)$$

$$\lambda_{л1} = 0.34 \cdot \frac{3}{0,25} \cdot (0,282 - 0.64 \cdot 0,889 \cdot 0,174) = 0,747$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмоток статора по (9.160)

$$\lambda_{д1} = t_{z1} \cdot \frac{10^3}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \varepsilon_1 \quad (4.44)$$

$$\lambda_{д1} = 0,0193 \cdot \frac{10^3}{12 \cdot 1,3 \cdot 1,09} \cdot 0,97 = 1,1$$

При полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов по (9.176) $k'_{ск} = 1,3$

$$\varepsilon = 2 \cdot k'_{ск} \cdot K_{\beta} - k_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_{ск}^2) \quad (4.45)$$

$$\varepsilon = 2 \cdot 1,3 \cdot 0,938 - 0,946^2 \cdot \left(\frac{24,7}{19,3}\right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 0,97$$

Расчетная длина магнитопровода для обмотки статора по (9.153)

$$l'_{\delta} = \ell_1 - 0.5 \cdot n_k \cdot b_k \quad (4.46)$$

$$l'_{\delta} = 0,25 - 0.5 \cdot 0 \cdot 0,01 = 0,25$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по (9.152)

$$x_1 = 15.8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) \quad (4.47)$$

$$x_1 = 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{48}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,25}{4 \cdot 3} \cdot (2,513 + 0,747 + 1,1) = 0,165$$

Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} \quad (4.48)$$

$$x_{1*} = 0,165 \cdot \frac{210,84}{220} = 0,158$$

При расчете номинального режима двигателя во всех формулах

ем $k_d = 1$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора по [1, табл. 9.27]

$$\lambda_{п2} = \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c}\right)^2 + 0.66 - \frac{b_{ш}}{2 \cdot b_1} \cdot \kappa_d + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \quad (4.49)$$

$$\lambda_{п2} = \frac{31,84}{3 \cdot 13,7} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot 13,7^2}{8 \cdot 453,2}\right)^2 + 0.66 - \frac{1,5}{2 \cdot 13,7} \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} = 1,615$$

$$h_0 = h_1 + 0.4 \cdot b_2 \quad (4.50)$$

$$h_0 = 27,6 + 0.4 \cdot 10,6 = 31,84 \text{ мм}$$

$$I_2 = 903,58 \text{ А}$$

Коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad (4.51)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(3,14 \cdot \frac{4}{56}\right) = 0,445$$

Расчетная длина магнитопровода для обмотки ротора по (9.154)

$$l'_\delta = \ell_{ст2} - 0.5 \cdot n_k \cdot b_k \quad (4.52)$$

$$l'_\delta = 0,25 - 0.5 \cdot 0 \cdot 0 = 0,25$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния ротора по (9.178)

$$\lambda_{л2} = 2.3 \cdot \frac{D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg\left(4.7 \cdot \frac{D_{кл.ср}}{h_{кл} + 2 \cdot b_{кл}}\right) \quad (4.53)$$

$$\lambda_{л2} = 2.3 \cdot \frac{0,389}{56 \cdot 0,25 \cdot 0,445^2} \cdot \lg\left(4.7 \cdot \frac{0,389}{0,051 + 2 \cdot 0,024}\right) = 0,409$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора по (9.180)

$$\lambda_{д2} = t_{z2} \cdot \frac{\varepsilon_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \quad (4.54)$$

$$\lambda_{д2} = 24,7 \cdot \frac{1}{12 \cdot 1,3 \cdot 1,09} = 1,45$$

$$\Delta_{z2} = 0,01$$

$$\varepsilon_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_{z2}}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} \quad (4.55)$$

$$\varepsilon_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(3,14 \cdot \frac{4}{56} \right)^2 - \frac{0,01}{1 - \left(\frac{4}{56} \right)^2} = 1$$

$$\lambda_{ск} = 0$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по (9.177)

$$x_2 = 7.9 \cdot f_1 \cdot l'_8 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2} + \lambda_{ск}) \quad (4.56)$$

$$x_2 = 7.9 \cdot 50 \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} \cdot (1,615 + 0,409 + 1,45 + 0) = 3,43 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Приводим сопротивление фазы обмотки ротора к числу витков статора по (9.172) и (9.183):

$$x'_2 = x_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2} \quad (4.57)$$

$$x'_2 = 3,43 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(48 \cdot 0,946)^2}{56 \cdot 1^2} = 0,152 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} \quad (4.58)$$

$$x'_{2*} = 0,152 \cdot \frac{210,84}{220} = 0,146$$

Расчет потерь

Потери в стали основные по (9.187)

$$P_{ст.осн} = \rho_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 \cdot (k_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (4.59)$$

$$P_{ст.осн} = 2 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^2 \cdot (1,6 \cdot 1,15^2 \cdot 122,97 + 1,8 \cdot 1,65^2 \cdot 47,42) = 985,17 \text{ Вт}$$

для стали 2314 по [1,табл. 9.28] $\rho_{1,0/5,0} = 2 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$

Удельная масса стали

$$\gamma_{ст} = 7.8 \cdot 10^3 = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}}$$

Масса стали ярма статора по (9.188)

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot \ell_{ст1} \cdot K_c \cdot \gamma_{ст} \quad (4.60)$$

$$m_a = 3,14 \cdot (0,59 - 0,0383) \cdot 0,0383 \cdot 0,25 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 122,97 \text{ кг}$$

Масса стали зубцов статора по (9.189)

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot 10^{-3} \cdot Z_1 \cdot \ell_{ст1} \cdot K_c \cdot \gamma_{ст} \quad (4.61)$$

$$m_{z1} = 0,0352 \cdot 10,1 \cdot 10^{-3} \cdot 72 \cdot 0,25 \cdot 0,95 \cdot 7800 = 47,42 \text{ кг}$$

Для машин мощностью меньше 250 кВт можно принять

$$k_{да} = 1,6 ; k_{дз} = 1,8$$

Поверхностные потери в роторе по (9.194)

$$P_{пов2} = p_{пов2уд} \cdot (t_{z2} - b_{ш}) \cdot Z_2 \cdot \ell_{ст2} \cdot 10^{-3} \quad (4.62)$$

$$P_{пов2} = 95,44 \cdot (24,7 - 1,5) \cdot 56 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} = 31 \text{ Вт}$$

Удельные поверхностные потери по (9.192)

$$p_{пов2уд} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(Z_1 \cdot \frac{n_0}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 \quad (4.63)$$

$$p_{пов2уд} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(72 \cdot \frac{750}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,165 \cdot 0,0193 \cdot 10^3)^2 = 95,44 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

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)

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad (4.64)$$

$$B_{02} = 0,2 \cdot 1,09 \cdot 0,755 = 0,165 \text{ Тл}$$

Для зубцов ротора определяем отношение $\frac{b_{ш}}{\delta} = 3,1$

тогда по [1, рис. 9.53] находим $\beta_{02} = 0,2$

Пульсационные потери в зубцах ротора по (9.200)

$$P_{пул2} = 0,11 \cdot \left(Z_1 \cdot \frac{n_0}{1000} \cdot B_{пул2} \right)^2 \cdot m_{z2} \quad (4.65)$$

$$P_{пул2} = 0,11 \cdot \left(72 \cdot \frac{750}{1000} \cdot 0,059 \right)^2 \cdot 42,69 = 47,7 \text{ Вт}$$

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

$$B_{\text{пул}2} = \gamma_1 \cdot \frac{\delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B'_{z2} \quad (4.66)$$

$$B_{\text{пул}2} = 1,17 \cdot \frac{1,3}{2 \cdot 24,7} \cdot 1,9 = 0,059 \text{ Тл}$$

Масса стали зубцов ротора по (9.201)

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot 10^{-3} \cdot \ell_{\text{ст}2} \cdot K_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad (4.67)$$

$$m_{z2} = 56 \cdot 0,0399 \cdot 10,1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 42,69 \text{ кг}$$

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. $P_{\text{пов}1} = 0 \text{ Вт}$; $P_{\text{пул}1} = 0 \text{ Вт}$

Суммарные добавочные потери в стали по (9.202)

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов}1} + P_{\text{пул}1} + P_{\text{пов}2} + P_{\text{пул}2} \quad (4.68)$$

$$P_{\text{ст.доб}} = 0 + 0 + 31 + 47,7 = 78,7 \text{ Вт}$$

Полные потери в стали по (9.203)

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} \quad (4.69)$$

$$P_{\text{ст}} = 985,17 + 78,7 = 1063,9 \text{ Вт}$$

Механические потери по (9.210)

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n_0}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 \quad (4.70)$$

$$P_{\text{мех}} = 0,533 \cdot \left(\frac{750}{10}\right)^2 \cdot 0,59^4 = 363,3 \text{ Вт}$$

для двигателей с $2p = 8$

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_a) \quad (4.71)$$

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - 0,59) = 0,533$$

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

$$P_{\text{элхх}} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 \quad (4.72)$$

$$P_{\varepsilon 1xx} = 3 \cdot 75,95^2 \cdot 0,024 = 415,3 \text{ Вт}$$

Ток холостого хода двигателя по (9.217)

$$I_{xx} = \sqrt{I_{xxa}^2 + I_{xxp}^2} \quad (4.73)$$

$$I_{xx} = \sqrt{2,792^2 + 75,95^2} = 76,001 \text{ А}$$

где активная составляющая тока холостого хода по (9.218)

$$I_{xxa} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{\varepsilon 1xx}}{m \cdot U_{1ном}} \quad (4.74)$$

$$I_{xxa} = \frac{1063,9 + 363,3 + 415,3}{3 \cdot 220} = 2,792 \text{ А}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода по (9.220) $I_{xxp} = I_{\mu} = 75,95 \text{ А}$

Ток холостого хода в относительных единицах

$$I_{xx*} = \frac{I_{xx}}{I_{1ном}} \quad (4.75)$$

$$I_{xx*} = \frac{76,001}{210,84} = 0,36 \text{ о. е.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{xx} = \frac{I_{xxa}}{I_{xx}} \quad (4.76)$$

$$\cos \varphi_{xx} = \frac{2,792}{76,001} = 0,037 \text{ о. е.}$$

5. Расчет параметров и построение рабочих и пусковых характеристик

Расчет рабочих характеристик

по (9.184)

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

$$r_{12} = \frac{985,17}{3 \cdot 75,95^2} = 0,06 \text{ Ом}$$

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

$$r_{12*} = 0,06 \cdot \frac{210,84}{220} = 0,06$$

по (9.185)

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

$$x_{12} = \frac{220}{75,95} - 0,165 = 2,73 \text{ Ом}$$

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

$$x_{12*} = 2,73 \cdot \frac{210,84}{220} = 2,62$$

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

$$\gamma = \arctg \left(\frac{0,024 \cdot 2,73 - 0,06 \cdot 0,165}{0,06 \cdot (0,024 + 0,06) + 2,73 \cdot (0,165 + 2,73)} \right) = 7 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,4^\circ$$

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

по (9.223)

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

$$c_1 = 1 + \frac{0,165}{2,73} = 1,06$$

по (9.227)

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

$$a' = 1,06^2 = 1,124$$

$$b' = 0$$

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

$$a = 1,06 \cdot 0,024 = 0,025$$

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

$$b = 1,06 \cdot (0,165 + 1,06 \cdot 0,152) = 0,346$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения

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

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 1063,9 + 363,3 = 1427,2 \text{ Вт}$$

Предварительно принимаем номинальное скольжение $s_{\text{НОМ}} = r_{2*}' = 0,015$

$$P_{2\text{НОМ}} = 110 \text{ кВт}; U_{1\text{НОМ}} = 220/380 \text{ В}; 2p = 8; I_{1\text{НОМ}} = 210,84 \text{ А}$$

$$I_{2\text{НОМ}}' = 741,91 \text{ А}; x_1 = 0,165 \text{ Ом}; x_2' = 0,152 \text{ Ом}; x_{12\text{П}} = 3,74 \text{ Ом};$$

$$c_{1\text{П}} = 1,04; r_1 = 0,024 \text{ Ом}; r_2' = 0,016 \text{ Ом}; s_{\text{НОМ}} = 0,015.$$

Таблица 5.1-Рабочие характеристики асинхронного двигателя

№ пп	Расчетная формула	Ед.изм	Скольжение, s					s _{НОМ}
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	
1	$a' \cdot r_2' / s$	Ом	3,6032	1,8016	1,2011	0,9008	0,7206	1,119
2	$b' \cdot r_2' / s$	Ом	0,0672	0,0336	0,0224	0,0168	0,0134	0,0209
3	$R = a + a' \cdot r_2' / s$	Ом	3,6242	1,8226	1,2221	0,9218	0,7416	1,14
4	$X = b + b' \cdot r_2' / s$	Ом	0,4132	0,3796	0,3684	0,3628	0,3594	0,3669
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	3,6477	1,8617	1,2764	0,9906	0,8242	1,1976
6	$I_2'' = U_{1H} / Z$	А	60,312	118,17	172,36	222,08	266,94	183,7
7	$\cos \varphi_2' = R / Z$	о.е.	0,9936	0,979	0,9574	0,9305	0,8999	0,9519
8	$\sin \varphi_2' = X / Z$	о.е.	0,1133	0,2039	0,2886	0,3662	0,4361	0,3063
9	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$	А	62,714	118,48	167,82	209,44	243,01	177,66
10	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$	А	82,782	100,04	125,7	157,28	192,37	132,23
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	103,86	155,07	209,67	261,92	309,93	221,47
12	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	А	63,991	125,38	182,88	235,63	283,22	194,91
13	$P_1 = 3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	41,391	78,196	110,76	138,23	160,38	117,26
14	$P_{\Sigma 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,7766	1,7313	3,1653	4,9395	6,9162	3,5314
15	$P_{\Sigma 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,1966	0,7546	1,6053	2,665	3,8504	1,8235
16	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} (I_1 / I_{1H})^2$	кВт	0,0191	0,0426	0,0778	0,1215	0,1701	0,0868
17	$\Sigma P = P_{\text{СТ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{ДОБ}}$	кВт	2,4194	3,9556	6,2756	9,1532	12,364	6,8689
18	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт	38,972	74,24	104,48	129,08	148,02	110,39
19	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	о.е.	0,942	0,949	0,943	0,934	0,923	0,9414
20	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	о.е.	0,604	0,764	0,800	0,800	0,784	0,8022

По результатам расчетов рабочих характеристик уточняем параметры двигателя $s_{\text{НОМ}} = 0,0161$ о.е.; $\eta_{\text{Н}} = 0,94$ о.е.; $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,8$ о.е.; $I_{2\text{Н}}' = 194,91$ А; $I_{1\text{Н}} = 221,47$ А

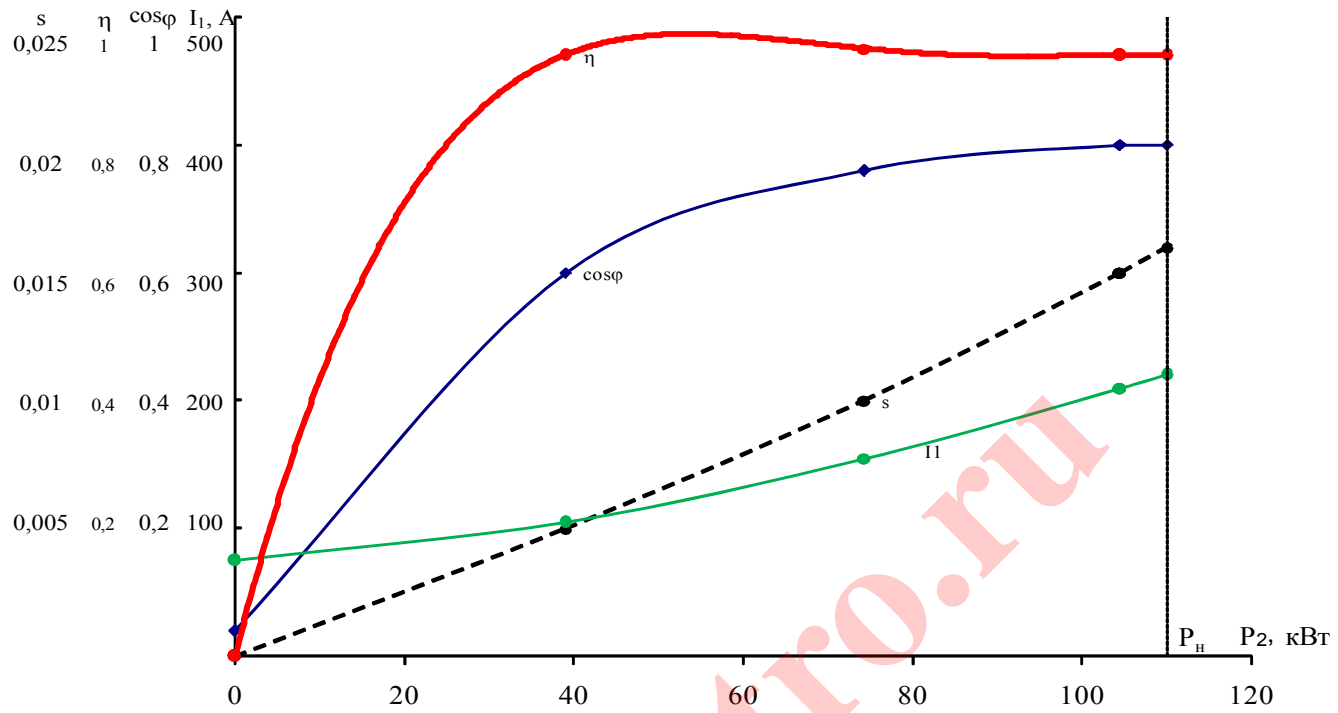


Рисунок 5.1–Рабочие характеристики двигателя

diplom-electro.ru

Расчет пусковых характеристик

Производим подробный расчет для скольжения $s=1$

Высота стержня в пазу ротора

$$h_c = h_{\Pi} - (h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}}) \quad (5.11)$$

$$h_c = 40,8 - (0,7 + 0,3) = 39,8 \text{ мм}$$

Приведенная высота стержня по (9.245) при 115°C

$$\xi = 63,61 \cdot h_c \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{s} \quad (5.12)$$

$$\xi = 63,61 \cdot 39,8 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1} = 2,53$$

по [1, рис. 9.57] находим $\varphi = 1,52$

Соответственно глубина проникновения тока

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} \quad (5.13)$$

$$h_r = \frac{39,8}{1 + 1,52} = 15,79 \text{ мм}$$

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) \quad (5.14)$$

$$b_r = 13,7 - \frac{13,7 - 10,6}{27,6} \cdot \left(15,79 - \frac{13,7}{2} \right) = 12,7 \text{ мм}$$

Площадь сечения стержня определяем по (9.253)

$$q_r = \pi \cdot \frac{b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) \quad (5.15)$$

$$q_r = 3,14 \cdot \frac{13,7^2}{8} + \frac{13,7 + 12,7}{2} \cdot \left(15,79 - \frac{13,7}{2} \right) = 191,71 \text{ мм}^2$$

по (9.247)

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} \quad (5.16)$$

$$k_r = \frac{453,2}{191,71} = 2,364$$

по (9.257)

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) \quad (5.17)$$

$$K_R = 1 + \frac{2,691 \cdot 10^{-5}}{3,57} \cdot 10^{-5} \cdot (2,364 - 1) = 2,028$$

$$r'_c = r_c = 2,691 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$$r'_{2e} = K_R \cdot r'_c \quad (5.18)$$

$$r'_{2e} = 2,028 \cdot 0,016 = 0,032 \text{ Ом}$$

по рис. 9.58 $\varphi' = 0,59$; $\kappa_d = \varphi' = 0,59$

Коэффициент магнитной проводимости участка паза, занятого проводником с обмоткой по [1, табл. 9.27, рис. 9.52, а, ж]

$$\lambda'_{п2} = \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \pi \cdot \frac{b_1^2}{8 \cdot q_c} + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2 \cdot b_1} \right) \quad (5.19)$$

$$\lambda'_{п2} = \frac{31,84}{3 \cdot 13,7} \cdot \left(1 - 3,14 \cdot \frac{13,7^2}{8 \cdot 453,2} + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 13,7} \right) = 1,118$$

$$\Delta\lambda'_{п2}\xi = \lambda'_{п2} \cdot (1 - \kappa_d) \quad (5.20)$$

$$\Delta\lambda'_{п2}\xi = 1,118 \cdot (1 - 0,59) = 0,458$$

тогда

$$\lambda'_{п2}\xi = \lambda_{л2} - \Delta\lambda'_{п2}\xi \quad (5.21)$$

$$\lambda'_{п2}\xi = 0,409 - 0,458 = -0,049$$

по (9.262)

$$K_x = \frac{\lambda'_{п2}\xi + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{л2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} \quad (5.22)$$

$$K_x = \frac{-0,049 + 0,409 + 1,45}{0,409 + 0,409 + 1,45} = 0,798$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока по (9.261)

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x \quad (5.23)$$

$$x'_{2\xi} = 0,152 \cdot 0,798 = 0,121$$

Пусковые параметры по (9.277) и (9.278)

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} \quad (5.24)$$

$$x_{12п} = 1,37 \cdot 2,73 = 3,74 \text{ Ом}$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} \quad (5.25)$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{0,165}{3,74} = 1,04$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока по (9.280)

$$R_{п} = r_1 + c_{1п} \cdot \frac{r'_{2e}}{s} \quad (5.26)$$

$$R_{п} = 0,024 + 1,04 \cdot \frac{0,032}{1} = 0,057 \text{ Ом}$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2\xi} \quad (5.27)$$

$$X_{п} = 0,165 + 1,04 \cdot 0,121 = 0,291 \text{ Ом}$$

по (9.281)

$$I'_2 = \frac{U_{1н\text{ом}}}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} \quad (5.28)$$

$$I'_2 = \frac{220}{\sqrt{0,057^2 + 0,291^2}} = 741,91 \text{ А}$$

по (9.283)

$$I_{1п} = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}} \quad (5.29)$$

$$I_{1п} = 741,91 \cdot \frac{\sqrt{0,057^2 + (0,291 + 3,74)^2}}{1,04 \cdot 3,74} = 768,96 \text{ А}$$

Расчет пусковых характеристик производим с учетом влияния насыщения от полей рассеяния

Первоначально задаются предполагаемой кратностью увеличения тока, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны $k_{\text{нас}} = 1,5$

Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора по (9.263)

$$F_{п.ср} = 0,7 \cdot \frac{k_{\text{нас}} \cdot I_{1п} \cdot u_{п}}{a} \cdot \left(K'_{\beta} + k_{y1} \cdot k_{o61} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad (5.30)$$

$$F_{\text{п.ср}} = 0.7 \cdot \frac{1,5 \cdot 768,96 \cdot 16}{4} \cdot \left(0,917 + 0,985 \cdot 0,946 \cdot \frac{72}{56} \right) = 6830,8 \text{ А}$$

по (9.265)

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} \quad (5.31)$$

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{1,3}{19,3 + 24,7}} = 1,07$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре по (9.264)

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-3} \quad (5.32)$$

$$B_{\phi\delta} = \frac{6830,8}{1.6 \cdot 1,3 \cdot 1,07} \cdot 10^{-3} = 3,07 \text{ Тл}$$

По [1,рис. 9.61] находим $k_\delta = 0,72$

Значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора по (9.266)

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{\text{ш}}) \cdot (1 - k_\delta) \quad (5.33)$$

$$c_{\varepsilon 1} = (19,3 - 4) \cdot (1 - 0,72) = 4,284 \text{ мм}$$

по (9.269)

$$\Delta\lambda'_{\text{п1нас}} = \frac{h_{\text{ш}} + 0.58 \cdot h_{\text{к}}}{b_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{c_{\varepsilon 1} + 1.5 \cdot b_{\text{ш}}} \quad (5.34)$$

$$\Delta\lambda'_{\text{п1нас}} = \frac{1 + 0.58 \cdot 6,1}{1,5} \cdot \frac{4,284}{4,284 + 1.5 \cdot 1,5} = 1,984$$

$$h_{\text{к}} = \frac{b_1 - b_{\text{ш}}}{2} \quad (5.35)$$

$$h_{\text{к}} = \frac{13,7 - 1,5}{2} = 6,1 \text{ мм}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора при насыщении по (9.272)

$$\lambda'_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda'_{\text{п1нас}} \quad (5.36)$$

$$\lambda'_{\text{п1нас}} = 2,513 - 1,984 = 0,529$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения по (9.274)

$$\lambda'_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k_{\delta} \quad (5.37)$$

$$\lambda'_{д1нас} = 1,1 \cdot 0,72 = 0,792$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения по (9.275)

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda'_{п1нас} + \lambda'_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}} \quad (5.38)$$

$$x_{1нас} = 0,165 \cdot \frac{0,529 + 0,792 + 0,747}{2,513 + 1,1 + 0,747} = 0,078 \text{ Ом}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока:

по (9.270)

$$c_{э2} = (t_{z2} - b_{ш}) \cdot (1 - k_{\delta}) \quad (5.39)$$

$$c_{э2} = (24,7 - 1,5) \cdot (1 - 0,72) = 6,496 \text{ мм}$$

по (9.271)

$$\Delta\lambda'_{п2нас} = \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{э2}}{b_{ш} + c_{э2}} \quad (5.40)$$

$$\Delta\lambda'_{п2нас} = \frac{0,7}{1,5} \cdot \frac{6,496}{1,5 + 6,496} = 0,379$$

по (9.273)

$$\lambda'_{п2нас} = \lambda_{л2} - \Delta\lambda'_{п2нас} \quad (5.41)$$

$$\lambda'_{п2нас} = 0,409 - 0,379 = 0,03$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения по (9.274)

$$\lambda'_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta} \quad (5.42)$$

$$\lambda'_{д2нас} = 1,45 \cdot 0,72 = 1,04$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения по (9.276)

$$x'_{2\xi_{\text{нас}}} = x'_2 \cdot \frac{\lambda'_{\text{п2нас}} + \lambda'_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}} \quad (5.43)$$

$$x'_{2\xi_{\text{нас}}} = 0,152 \cdot \frac{0,03 + 1,04 + 0,409}{0,409 + 1,45 + 0,409} = 0,099 \text{ Ом}$$

по (9.278)

$$c_{1\text{п.нас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}} \quad (5.44)$$

$$c_{1\text{п.нас}} = 1 + \frac{0,078}{3,74} = 1,021$$

Расчет токов и моментов:

по (9.280)

$$R_{\text{пнас}} = r_1 + c_{1\text{п.нас}} \cdot \frac{r'_{2e}}{s} \quad (5.45)$$

$$R_{\text{пнас}} = 0,024 + 1,021 \cdot \frac{0,032}{1} = 0,057 \text{ Ом}$$

$$X_{\text{пнас}} = x_{1\text{нас}} + c_{1\text{п.нас}} \cdot x'_{2\xi_{\text{нас}}} \quad (5.46)$$

$$X_{\text{пнас}} = 0,078 + 1,021 \cdot 0,099 = 0,179 \text{ Ом}$$

по (9.281)

$$I'_{2\text{нас}} = \frac{U_{1\text{ном}}}{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + X_{\text{пнас}}^2}} \quad (5.47)$$

$$I'_{2\text{нас}} = \frac{220}{\sqrt{0,057^2 + 0,179^2}} = 1171,11 \text{ А}$$

по (9.283)

$$I_{1\text{пнас}} = I'_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + (X_{\text{пнас}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{п.нас}} \cdot x_{12\text{п}}} \quad (5.48)$$

$$I_{1\text{пнас}} = 1171,11 \cdot \frac{\sqrt{0,057^2 + (0,179 + 3,74)^2}}{1,021 \cdot 3,74} = 1202,05 \text{ А}$$

Кратность пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения

$$I_{\text{п*}} = \frac{I_{1\text{пнас}}}{I_{1\text{ном}}} \quad (5.49)$$

$$I_{п*} = \frac{1202,05}{210,84} = 5,7$$

Кратность пускового момента с учетом влияния вытеснения тока и насыщения по (9.284)

$$M_{п*} = \left(\frac{I'_{2нас}}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_{НОМ}}{S} \quad (5.50)$$

$$M_{п*} = \left(\frac{1171,11}{194,91} \right)^2 \cdot 2,028 \cdot \frac{0,0161}{1} = 1,18$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения

$$k'_{нас} = \frac{I_{1пнас}}{I_{1п}} \quad (5.51)$$

$$k'_{нас} = \frac{1202,05}{768,96} = 1,56$$

Расхождение с предварительно принятым значением

$$\Delta = \frac{k'_{нас} - k_{нас}}{k_{нас}} \cdot 100 \quad (5.52)$$

$$\Delta = \frac{1,56 - 1,5}{1,5} \cdot 100 = 4 \%$$

Так как расхождение с предварительно принятым значением менее 10% расчет закончен

Критическое скольжение предварительно по (9.286)

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{\frac{x_1}{c_{1п}} + x'_2} \quad (5.53)$$

$$s_{кр} = \frac{0,016}{\frac{0,165}{1,04} + 0,152} = 0,05$$

Критический(максимальный) момент $M_{макс*} = 2,23$

Таблица 5.2-Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока

№ п/п	Расчетная формула	Размерность	Скольжение s					S _{кр}
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	
1	$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s}$	-	2,53	2,26	1,79	1,13	0,8	0,57
2	$\varphi = f(\xi)$	-	1,52	1,19	0,61	0,13	0,36	0,09
3	$h_r = h_c / (1 + \varphi)$	мм	15,79	18,17	24,72	35,22	29,26	36,51
4	$k_r = q_c / q_r$	-	2,364	2,045	1,508	1,086	1,286	1,052
5	$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r'_2} (k_r - 1)$	-	2,028	1,788	1,383	1,065	1,216	1,039
6	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом	0,032	0,029	0,022	0,017	0,019	0,017
7	$k_\sigma = \varphi'(\xi)$	-	0,59	0,67	0,81	0,95	0,97	0,97
8	$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta \lambda_{\Pi 2\xi}$	-	-0,049	0,04	0,197	0,353	0,375	0,375
9	$K_X = \sum \lambda_{2\xi} / \sum \lambda_2$	-	0,798	0,837	0,907	0,975	0,985	0,985
10	$x'_{2\xi} = K_X x'_2$	Ом	0,121	0,127	0,138	0,148	0,15	0,15
11	$R_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi} \frac{r'_{2\xi}}{S}$	Ом	0,057	0,062	0,07	0,112	0,222	0,378
12	$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} x'_{2\xi}$	Ом	0,291	0,297	0,309	0,319	0,321	0,321
13	$I'_{2\Pi} = U_{НОМ} / \sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}$	А	741,9	725,1	694,4	650,7	563,7	443,6
14	$I'_{1\Pi} = I'_2 \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} x_{12\Pi}}$	А	769	752,7	722,9	679,3	589,4	465,2

Таблица 5.3-Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

№ п/ п	Расчетная формула	Раз- мер- ность	Скольжение s					S _{кр}
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	
1	k _{нас}	—	1,5	1,4	1,25	1,1	1,05	1,025
2	$F_{п.ср} = 0,7 \frac{I_1 k_{нас} u_n}{a} (k'_\beta + k_{\gamma 1} k_{обл} \frac{Z_1}{Z_2})$	А	6831	6240	5352	4425	3665	2824
3	$B_{Ф\delta} = F_{п.ср} 10^{-6} / (1,6 \delta C_N)$	Тл	3,07	2,8	2,4	1,99	1,65	1,27
4	k _δ = f (B _{Фδ})	—	0,72	0,76	0,82	0,87	0,92	0,95
5	c ₁ = (t _{z1} - b _ш)(1 - k _δ)	мм	4,284	3,672	2,754	1,989	1,224	0,765
6	$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta \lambda_{п1нас}$	—	0,529	0,637	0,848	1,093	1,447	1,745
7	$\lambda_{Д1нас} = k_\delta \lambda_{Д1}$	—	0,792	0,836	0,902	0,957	1,012	1,045
8	$X_{1нас} = x_1 \sum \lambda_{1нас} / \sum \lambda_1$	Ом	0,078	0,084	0,094	0,106	0,121	0,134
9	c _{1п} = 1 + X _{1нас} / X _{12п}	—	1,021	1,022	1,025	1,028	1,032	1,036
10	c ₂ = (t _{z2} - b _{ш2})(1 - k _δ)	мм	6,496	5,568	4,176	3,016	1,856	1,16
11	$\lambda_{п2\xiнас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta \lambda_{п2нас}$	—	0,03	0,041	0,066	0,097	0,151	0,205
12	$\lambda_{Д2нас} = k_\delta \lambda_{Д2}$	—	1,04	1,1	1,19	1,26	1,33	1,38
13	$X'_{2\xiнас} = x'_2 \sum \lambda_{2\xiнас} / \sum \lambda_2$	Ом	0,099	0,104	0,112	0,118	0,127	0,134
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} r'_{2\xi} / s$	Ом	0,057	0,061	0,069	0,111	0,22	0,376
15	$X_{п.нас} = X_{1нас} + c_{1п.нас} X'_{2\xiнас}$	Ом	0,179	0,19	0,209	0,227	0,252	0,273
16	$I'_{2нас} = U_1 / \sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}$	А	1171	1102	999,6	870,7	657,7	473,5
17	$I_{1нас} = I'_{2нас} \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} x_{12п}}$	А	1202	1134	1030	898,7	681,2	492,5
18	k' _{нас} = I _{1нас} / I _{1п}	—	1,56	1,51	1,42	1,32	1,16	1,06
19	I _{1*} = I _{1нас} / I _{1НОМ}	—	5,7	5,38	4,88	4,26	3,23	2,34
20	$M^* = \left(\frac{I'_{2нас}}{I'_{2НОМ}} \right)^2 K_R \frac{S_{НОМ}}{S}$	—	1,18	1,15	1,17	1,71	2,23	1,97

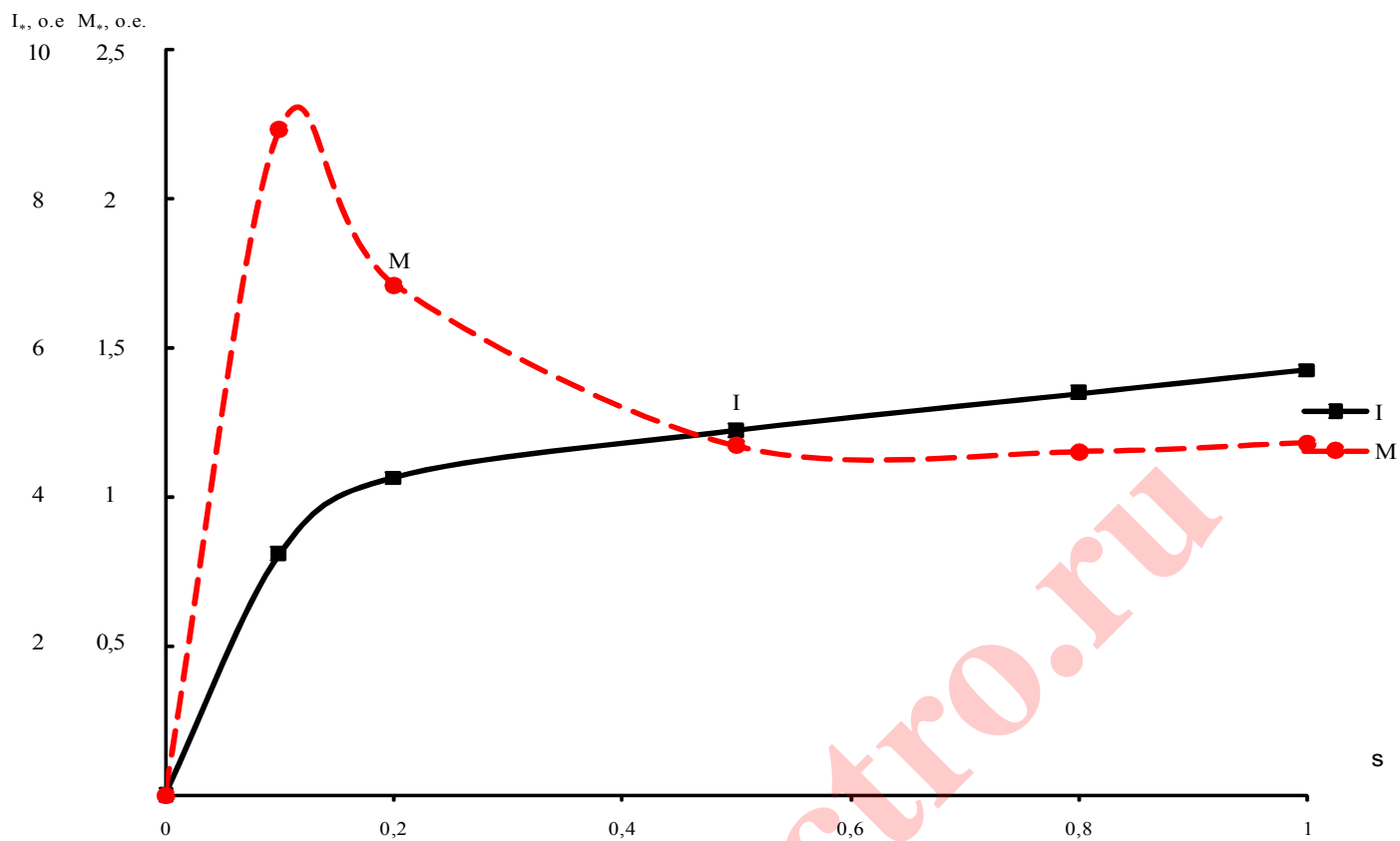


Рисунок 5.2– Пусковые характеристики двигателя

diplom-electro.ru

6. Тепловой расчет

Тепловой расчет

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

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

$$\Delta u_{\text{пов1}} = 0,18 \cdot \frac{1775,7 + 985,17}{3,14 \cdot 0,443 \cdot 0,25 \cdot 100} = 14,28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где по [1, табл. 9.35] $K = 0,18$

по (9.313)

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

$$P'_{\text{Эп}} = 1,07 \cdot 3531,4 \cdot 2 \cdot \frac{0,25}{1,064} = 1775,7 \text{ Вт}$$

где из расчета рабочих характеристик находим при номинальном токе $P_{\text{Э1}} = 3531,4 \text{ Вт}$

Определяем по [1, рис. 9.67] $\alpha_1 = 100 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot ^\circ\text{C}$

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)

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

$$\Delta u_{\text{изп1}} = \frac{1775,7}{72 \cdot 0,087 \cdot 0,25} \cdot \left(\frac{0,4}{0,16} + \frac{(9,5 + 12,3)}{16 \cdot 1,5} \right) \cdot 10^{-3} = 3,86 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где расчетный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полузакрытых трапециевидальных пазов

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

$$\Pi_{\text{п1}} = 2 \cdot 32,6 + 9,5 + 12,3 = 87 \text{ мм} = 0,087 \text{ м}$$

$$\frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{из}}} = \frac{2,5}{2,6} = 0,96 \quad (6.5)$$

по [1, рис. 9.69] для $\frac{d}{d_{\text{из}}}$ определяем $\lambda''_{\text{экв}} = 1,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot \text{°C}$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей по (9.319)

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

$$\Delta u_{\text{из.л1}} = \frac{1850,2}{2 \cdot 72 \cdot 0,087 \cdot 0,282} \cdot \left(\frac{0,05}{0,16} + \frac{35,2}{12 \cdot 1,5} \right) \cdot 10^{-3} = 1,19 \text{ °C}$$

где по (9.314)

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

$$P'_{\text{эл1}} = 1,07 \cdot 3531,4 \cdot 2 \cdot \frac{0,2605}{1,064} = 1850,2 \text{ Вт}$$

$$b_{\text{из.л1}} = 0,05 \text{ мм}; \quad \Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{п1}} = 0,087 \text{ м}$$

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

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

$$\Delta u_{\text{пов.п1}} = \frac{0,18 \cdot 1850,2}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,443 \cdot 0,0935 \cdot 100} = 12,8 \text{ °C}$$

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

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

$$\Delta u'_{\text{пов.п1}} = \frac{(14,28 + 3,86) \cdot 2 \cdot 0,25 + (3,86 + 1,19) \cdot 2 \cdot 0,282}{1,064} = 11,2 \text{ °C}$$

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

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

$$\Delta u_B = \frac{4652,88}{2,66 \cdot 23,8} = 73,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

по (9.326)

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

$$\Sigma P'_B = 7243,76 - (1 - 0,18) \cdot (1775,7 + 985,17) - 0,9 \cdot 363,3 = 4652,88 \text{ Вт}$$

где по (9.324)

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{эл1}} + P_{\text{эл2}}) \quad (6.12)$$

$$\Sigma P' = 6868,92 + (1,07 - 1) \cdot (3531,4 + 1823,5) = 7243,76 \text{ Вт}$$

из расчета рабочих характеристик при номинальном скольжении

ем $\Sigma P = 6868,92 \text{ Вт}$

по (9.327)

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

$$S_{\text{кор}} = (3,14 \cdot 0,59 + 8 \cdot 0,53) \cdot (0,25 + 2 \cdot 0,0935) = 2,66 \text{ м}^2$$

где по [1, рис. 9.70] для $h = 315 \text{ мм}$ $P_p = 0,53 \text{ м}$

по [1, рис. 9.67] $\alpha_B = 23,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot ^\circ\text{C}$

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

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

$$\Delta u_1 = 11,2 + 73,5 = 84,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Проверка условий охлаждения двигателя.

Требуемый для охлаждения расход воздуха по (9.340)

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

$$Q_B = 5,26 \cdot \frac{4652,88}{1100 \cdot 73,5} = 0,303 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

где по (9.341)

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

$$k_m = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{750}{100}} \cdot 0,59 = 5,26$$

где коэффициент $m' = 2,5$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (9.342)

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

$$Q'_B = 0,6 \cdot 0,59^3 \cdot \frac{750}{100} = 0,924 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах.

Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

diplom-electro.ru

Заключение

Сравним параметры спроектированного АД, полученные в результате расчетов с заданными по условиям проектирования.

Таблица 7.1-Параметры спроектированного двигателя

Параметр	η	$\cos\varphi$	$I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$	$M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$	$M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$
Спроектированный двигатель	0,94	0,8	5,7	1,18	2,23
Задание на проектирование	0,8-0,9	0,85-0,9	6-7	1,5-2	2-2,5

Параметры спроектированного двигателя отвечают заданным условиям и примерно соответствуют справочным параметрам двигателей аналогичного класса

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