

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	30
6. Тепловой расчет	43
Заключение	47
Список использованных источников	48

1. Введение

Согласно заданию необходимо спроектировать трехфазный асинхронный электродвигатель мощностью 37 кВт, с частотой вращения 3000 об/мин, напряжением 220 / 380 В при частоте 50Гц; ротор – короткозамкнутый, исполнение двигателя по степени защиты IP23 . В качестве базовой модели принята конструкция асинхронного двигателя серии 4АН.

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

diplom-electro.ru

2. Выбор основных размеров двигателя

Частота полюсов определяется по формуле:

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

$$p = 60 \cdot \frac{50}{3000} = 1$$

Высота оси вращения двигателя по [1, табл. 9.1] при заданной мощности и числе полюсов принимается $h = 180$ мм

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

$$D_a = 0,322 \text{ м}$$

Внутренний диаметр статора

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

$$D = 0,52 \cdot 0,322 = 0,167 \text{ м}$$

где K_D по [1, табл 9.9] $K_D = 0,52$

Полюсное деление

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

$$\tau = 3,14 \cdot \frac{0,167}{2} = 0,262 \text{ м}$$

Расчетная мощность по (9.4)

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

$$P' = 37 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,98}{0,9 \cdot 0,9} = 44765,4 \text{ В} \cdot \text{А}$$

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

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

Электромагнитные нагрузки предварительно по [1, рис. 9.22]

$$A = 50000 \frac{\text{А}}{\text{м}}; B_\delta = 0,8 \text{ Тл}$$

Обмоточный коэффициент (предварительно для двухслойной обмотки)

$$k_{об} = 0,9$$

Коэффициент формы поля

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

Синхронная угловая скорость вала двигателя

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

$$\Omega = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{3000}{60} = 314,2 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Расчетная длина магнитопровода по (9.6)

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

$$\ell_{\delta} = \frac{44765,4}{1,11 \cdot 0,167^2 \cdot 314,2 \cdot 0,9 \cdot 50000 \cdot 0,8} = 0,13 \text{ м}$$

В асинхронных двигателях, длина сердечников которых не превышает 250...300 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции $\ell_{ст1} = \ell_{\delta} = 0,13 \text{ м}$

Конструктивная длина сердечника статора $\ell_1 = \ell_{ст1} = 0,13 \text{ м}$

Проверка правильности выбора размеров двигателя

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

$$\lambda = \frac{0,13}{0,262} = 0,5$$

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

3. Расчет обмоток статора и ротора

Предельные значения зубцевого деления (по рис. 9.26)

$$t_{z1\max} = 0,0183 \text{ м}; t_{z1\min} = 0,0154 \text{ м}$$

Число пазов статора по (9.16)

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

$$Z_{1\min} = 3,14 \cdot \frac{0,167}{0,0183} = 29$$

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

$$Z_{1\max} = 3,14 \cdot \frac{0,167}{0,0154} = 34$$

Принимаем по [1, табл. 9.18] $Z_1 = 30$

тогда

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

$$q = \frac{30}{2 \cdot 3} = 5$$

где число фаз $m = 3$

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

Зубцовое деление статора (окончательно)

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

$$t_{z1} = 3,14 \cdot \frac{0,167}{2 \cdot 3 \cdot 5} = 0,0175 \text{ м} = 17,5 \text{ мм}$$

Номинальный ток обмотки статора (по 9.18)

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

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{37 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 69,21 \text{ А}$$

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

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

$$u'_\pi = 3,14 \cdot 0,167 \cdot \frac{50000}{69,21 \cdot 30} = 12,6 \text{ шт}$$

Принимаем число параллельных ветвей $a = 2$ шт

тогда по (9.19)

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

$$u_\pi = 2 \cdot 12,6 = 25,2 \text{ шт принимаем } 26 \text{ шт}$$

Окончательные значения:

число витков в фазе по (9.20)

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

$$w_1 = 26 \cdot \frac{30}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 65 \text{ шт}$$

линейная нагрузка по (9.21)

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

$$A = 2 \cdot 69,21 \cdot 65 \cdot \frac{3}{3,14 \cdot 0,167} = 51448 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

магнитный поток по (9.22)

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

$$\Phi = 0,985 \cdot \frac{220}{4 \cdot 1,11 \cdot 65 \cdot 0,957 \cdot 50} = 0,0157 \text{ Вб}$$

индукция в магнитном зазоре

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

$$B_\delta = 1 \cdot \frac{0,0157}{0,167 \cdot 0,13} = 0,723 \text{ Тл}$$

где при $q = 5$ по [1, табл. 3.16]

$$K_{p1} = 0,957$$

Расчетный шаг по [1, (3.9)]

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

$$y_{расч} = 2 \cdot (5 + 1) = 12$$

Принимаем шаг обмотки $y = 12$

Укорочение шага [1, 3.12]

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

$$\beta = \frac{12}{15} = 0,8$$

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

$$\tau_1 = \frac{30}{2} = 15$$

Коэффициент укорочения (3.6)

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

$$k_{y1} = \sin\left(\frac{3,14}{2} \cdot 0,8\right) = 0,951$$

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

$$K_{об1} = 0,957 \cdot 0,951 = 0,91$$

для $D_a = 0,272$ м по [1, рис. 9.20] $K_e = 0,985$

Предварительно принимаем произведение линейной нагрузки на плотность

$$\text{тока [1, рис. 9.27]} \quad AJ_1 = 310 \cdot 10^9 \frac{\text{A}^2}{\text{м}^3}$$

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

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

$$J_1 = \frac{310 \cdot 10^9}{51448} = 6,03 \cdot 10^{-6} \frac{\text{A}}{\text{м}^2} = 6,03 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно)

по (9.24)

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

$$q_{\text{эф}} = \frac{69,21}{2 \cdot 6,03} = 5,74 \text{ мм}^2$$

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 $n_{\text{эл}} = 3$

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

$$q_{\text{эл}} = \frac{5,74}{3} = 1,913 \text{ мм}^2$$

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 $d_{\text{эл}} = 1,6$ мм

Средний диаметр изолированного провода $d_{\text{из}} = 1,685$ мм

Площадь поперечного сечения неизолированного провода $q_{\text{эл}} = 2,011 \text{ мм}^2$

Окончательное сечение эффективного проводника

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

$$q_{\text{эф}} = 2,011 \cdot 3 = 6,033 \text{ мм}^2$$

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

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

$$J_1 = \frac{69,21}{2 \cdot 2,011 \cdot 3} = 5,736 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

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 $2p=2$

Индукция в зубце статора $B_{z1} = 1,75$ Тл

Индукция в ярме статора $B_a = 1,4$ Тл

тогда по (9.37) ширина зубца статора

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

$$b_{z1} = 0,8 \cdot 0,0175 \cdot \frac{0,13}{1,75 \cdot 0,13 \cdot 0,97} = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 8,2 \text{ мм}$$

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

Высота ярма статора по [1, 9.28]

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

$$h_a = \frac{0,0157}{2 \cdot 1,4 \cdot 0,13 \cdot 0,97} = 0,0445 \text{ м} = 44,5 \text{ мм}$$

Рассчитываем размеры паза в штампе

Нормализованная ширина шлица паза по [1, табл. 9.16] $b_{ш} = 4$ мм

Высота шлица паза при высоте оси вращения двигателя

$h = 180$ мм $h_{ш} = 1$ мм; $\beta = 45$ град

Размеры паза по (9.38-9.45)

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

$$h_{п} = \frac{0,322 - 0,167}{2} - 0,0445 = 0,033 \text{ м} = 33 \text{ мм}$$

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

$$b_1 = \frac{3,14 \cdot (167 + 2 \cdot 1 - 4) - 30 \cdot 8,2}{30 - 3,14} = 10,1 \text{ мм}$$

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

$$b_2 = 3,14 \cdot \frac{167 + 2 \cdot 33}{30} - 8,2 = 16,2 \text{ мм}$$

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

$$h_{п.к} = 33 - (1 + 3,1) = 28,9 \text{ мм}$$

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

$$h_k = \frac{10,1 - 4}{2} = 3,1 \text{ мм}$$

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:

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

$$b'_1 = 10,1 - 0,2 = 9,9 \text{ мм}$$

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

$$b'_2 = 16,2 - 0,2 = 16 \text{ мм}$$

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

$$h'_{\pi.к} = 28,9 - 0,2 = 28,7 \text{ мм}$$

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

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

$$S_{пр} = (0,9 \cdot 10,1 + 0,4 \cdot 16,2) = 15,6 \text{ мм}$$

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

Площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу

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

$$S_{из} = 0,4 \cdot (2 \cdot 33 + 10,1 + 16,2) = 36,9 \text{ мм}^2$$

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

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

$$S'_{\pi} = \frac{9,9 + 16}{2} \cdot 28,7 - (15,6 + 36,9) = 319,2 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения паза по (3.2):

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

$$K_3 = 1,685^2 \cdot 26 \cdot \frac{3}{319,2} = 0,69$$

Таким образом, полученное значение допустимо для механизированной укладки обмотки 0,69...0,7.

Расчет ротора

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

Число пазов ротора по [1,табл. 9.18] $Z_2 = 38$

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

Внешний диаметр ротора

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta \quad (3.36)$$

$$D_2 = 167 - 2 \cdot 1,1 = 164,8 \text{ мм} = 0,1648 \text{ м}$$

Длина магнитопровода ротора $\ell_{ст2} = \ell_{ст1} = 0,13$ м

Зубцовое деление ротора

$$t_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2}{Z_2} \quad (3.37)$$

$$t_{z2} = 3,14 \cdot \frac{164,8}{38} = 13,6 \text{ мм} = 0,0136 \text{ м}$$

Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал, тогда по (9.102) $D_j = D_B = 0,0741$ м

$$D_B = k_B \cdot D_a \quad (3.38)$$

$$D_B = 0,23 \cdot 0,322 = 0,0741 \text{ м}$$

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

по (9.58)

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos\varphi_{ном} \quad (3.39)$$

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot 0,9 = 0,92$$

по (9.66)

$$v_i = 2 \cdot m \cdot w_1 \cdot \frac{K_{об1}}{Z_2 \cdot k_{ск}} \quad (3.40)$$

$$v_i = 2 \cdot 3 \cdot 65 \cdot \frac{0,91}{38 \cdot 1} = 9,34$$

Ток в обмотке ротора по (9.57)

$$I_2 = k_i \cdot I_{1\text{ном}} \cdot v_i \quad (3.41)$$

$$I_2 = 0,92 \cdot 69,21 \cdot 9,34 = 594,71 \text{ А}$$

Плотность тока в стержне литой клетки принимаем $J_2 = 3,5 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) по (9.68)

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

$$q_c = \frac{594,71}{3,5} = 169,9 \text{ мм}^2$$

В двигателях с $h = 160 \dots 250$ мм выполняют трапециевидные закрытые пазы [1, рис. 9.40, б] с размерами шлица паза

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

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

$$B_{z2} = 1,9 \text{ Тл}$$

Допустимая ширина зубца по (9.75)

$$b_{z2\text{доп}} = B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot \frac{\ell_{\delta}}{B_{z2} \cdot \ell_{\text{ст}2} \cdot K_c} \quad (3.43)$$

$$b_{z2\text{доп}} = 0,723 \cdot 13,6 \cdot \frac{0,13}{1,9 \cdot 0,13 \cdot 0,97} = 5,34 \text{ мм}$$

принимаем $b_{z2} = b_{z2\text{доп}} = 5,3 \text{ мм}$

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]

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{\text{ш}} - 2 \cdot h'_{\text{ш}}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} \quad (3.44)$$

$$b_1 = \frac{3,14 \cdot (164,8 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 1) - 38 \cdot 5,3}{3,14 + 38} = 7,4 \text{ мм}$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} \quad (3.45)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{7,4^2 \cdot \left(\frac{38}{3,14} + \frac{3,14}{2}\right) - 4 \cdot 169,9}{\frac{38}{3,14} + \frac{3,14}{2}}} = 2,2 \text{ мм}$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} \quad (3.46)$$

$$h_1 = (7,4 - 2,2) \cdot \frac{38}{2 \cdot 3,14} = 31,4 \text{ мм}$$

Полная высота паза ротора

$$h_{\pi} = \frac{b_1 + b_2}{2} + h_1 + h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}} \quad (3.47)$$

$$h_{\pi} = \frac{7,4 + 2,2}{2} + 31,4 + 0,7 + 1 = 37,9 \text{ мм}$$

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

$$b'_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot (h_{\text{ш}} + h'_{\text{ш}}) \cdot b_1}{Z_2} - b_1 \quad (3.48)$$

$$b'_{z2} = 3,14 \cdot \frac{164,8 - 2 \cdot (0,7 + 1) \cdot 7,4}{38} - 7,4 = 5,3 \text{ мм}$$

$$b''_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{\pi} + b_2}{Z_2} - b_2 \quad (3.49)$$

$$b''_{z2} = 3,14 \cdot \frac{164,8 - 2 \cdot 37,9 + 2,2}{38} - 2,2 = 5,3 \text{ мм}$$

$$b_{z2} = b'_{z2} = b''_{z2} = 5,3 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения стержня по (9.79)

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 \quad (3.50)$$

$$q_c = \frac{3,14}{8} \cdot (7,4^2 + 2,2^2) + \frac{1}{2} \cdot (7,4 + 2,2) \cdot 31,4 = 174,1 \text{ мм}^2$$

Плотность тока в стержне

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} \quad (3.51)$$

$$J_2 = \frac{594,71}{174,1} = 3,42 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

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

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad (3.52)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(3,14 \cdot \frac{1}{38}\right) = 0,165$$

$$I_{\text{ккл}} = \frac{I_2}{\Delta} \quad (3.53)$$

$$I_{\text{ккл}} = \frac{594,71}{0,165} = 3604,3 \text{ А}$$

Плотность тока в замыкающих кольцах

$$J_{\text{ккл}} = 0,85 \cdot J_2 \quad (3.54)$$

$$J_{\text{ккл}} = 0,85 \cdot 3,42 = 2,91 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}$$

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)

$$q_{\text{ккл}} = \frac{I_{\text{ккл}}}{J_{\text{ккл}}} \quad (3.55)$$

$$q_{\text{ккл}} = \frac{3604,3}{2,91} = 1238,6 \text{ мм}^2$$

Размеры короткозамыкающих колец:

$$h_{\text{ккл}} = 1,25 \cdot h_{\text{п}} \quad (3.56)$$

$$h_{\text{ккл}} = 1,25 \cdot 37,9 = 47 \text{ мм}$$

$$b_{\text{ккл}} = \frac{q_{\text{ккл}}}{h_{\text{ккл}}} \quad (3.57)$$

$$b_{\text{ккл}} = \frac{1238,6}{47} = 26 \text{ мм}$$

$$q_{\text{ккл}} = h_{\text{ккл}} \cdot b_{\text{ккл}} \quad (3.58)$$

$$q_{\text{ккл}} = 47 \cdot 26 = 1222 \text{ мм}^2$$

$$D_{\text{ккл.ср}} = D_2 - h_{\text{ккл}} \quad (3.59)$$

$$D_{\text{ккл.ср}} = 164,8 - 47 = 118 \text{ мм}$$

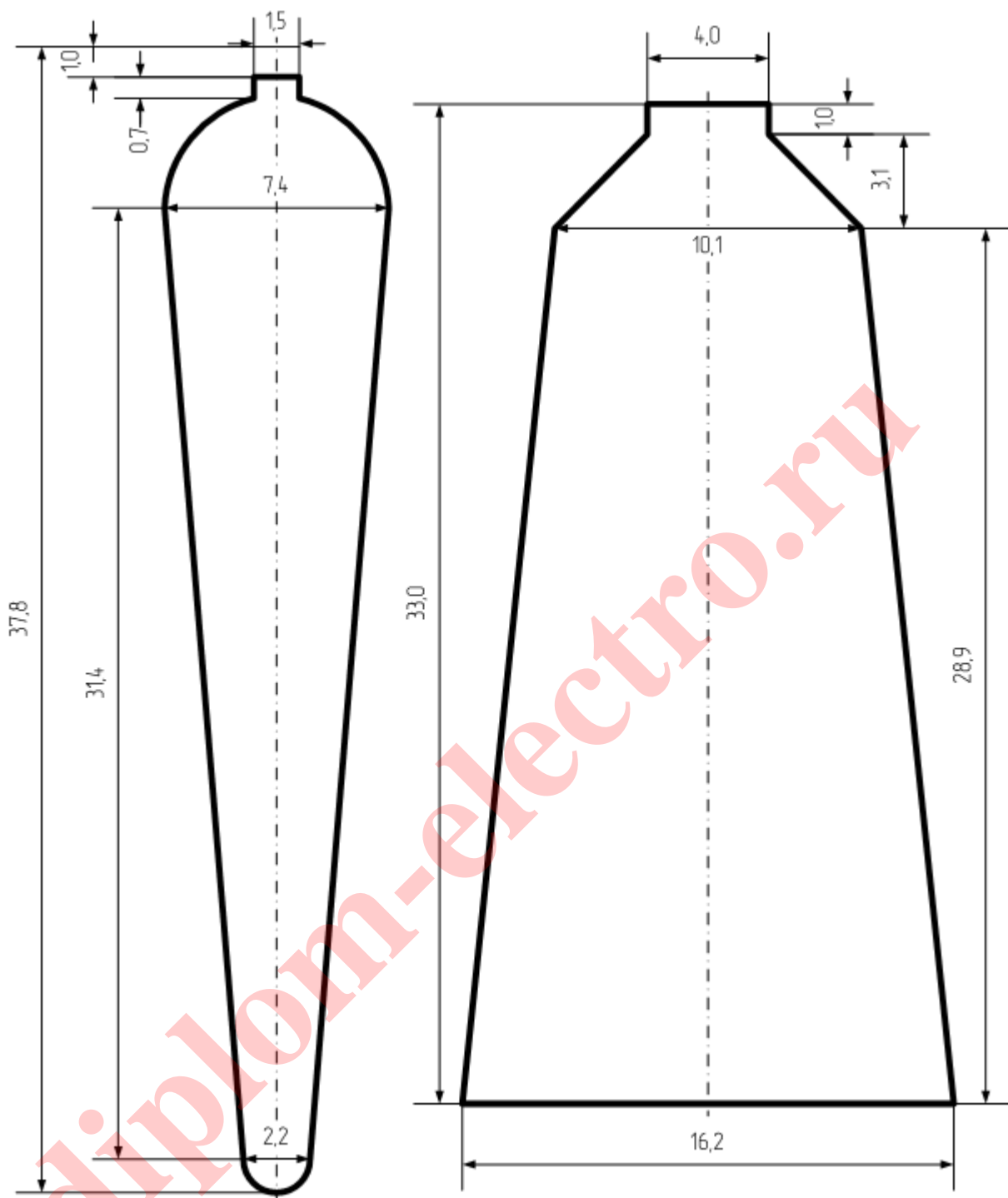


Рисунок 3.1-Пазы статора и ротора спроектированного двигателя

4. Расчет магнитной цепи, потерь и КПД

Расчет магнитной цепи

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

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

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{4}{1,1}\right)^2}{5 + \frac{4}{1,1}} = 1,53$$

по (4.15)

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

$$k_\delta = \frac{17,5}{17,5 - 1,53 \cdot 1,1} = 1,11$$

Магнитное напряжение воздушного зазора по (9.103)

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

$$F_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,723 \cdot 1,1 \cdot 1,11 \cdot 10^{-3} = 1403,62 \text{ А}$$

Расчетная высота зубца статора $h_{z1} = h_n = 0,033 \text{ м}$

Расчетная индукция в зубцах статора (9.105)

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

$$B_{sz1} = 0,723 \cdot 17,5 \cdot \frac{0,13}{8,2 \cdot 0,13 \cdot 0,97} = 1,59 \text{ Тл}$$

По [1, П. 1.7] для расчетной индукции B_{z1} находим $H_{z1} = 840 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора по (9.104)

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

$$F_{z1} = 2 \cdot 0,033 \cdot 840 = 55,4 \text{ А}$$

Расчетная высота зубца ротора

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

$$h_{z2} = 0,038 - 0,1 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,0378 \text{ м} = 37,8 \text{ мм}$$

Расчетная индукция в зубцах ротора (9.109)

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

$$B'_{z2} = 0,723 \cdot 13,6 \cdot \frac{0,13}{5,3 \cdot 0,13 \cdot 0,97} = 1,91 \text{ Тл}$$

по [1, П. 1.7] для расчетной индукции B'_{z2} находим $H_{z2} = 2180 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора по (9.108)

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

$$F_{z2} = 2 \cdot 0,0378 \cdot 2180 = 164,8 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны по (9.115)

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

$$k_z = 1 + \frac{55,4 + 164,8}{1403,62} = 1,16$$

Расчетная высота ярма статора по (9.118)

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

$$h'_a = \frac{0,322 - 0,167}{2} - 0,033 = 0,0445 \text{ м}$$

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

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

$$L_a = 3,14 \cdot \frac{0,322 - 0,0445}{2} = 0,4359 \text{ м}$$

Индукция в ярме статора по (9.117)

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

$$B_a = \frac{0,0157}{2 \cdot 0,0445 \cdot 0,13 \cdot 0,97} = 1,4 \text{ Тл}$$

по [1, П.1.6] для расчетной индукции находим $H_a = 400 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение ярма статора по (9.116)

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

$$F_a = 0,4359 \cdot 400 = 174,36 \text{ А}$$

Расчетная высота ярма ротора по (9.124)

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

$$h'_j = \frac{2 + 1}{3.2 \cdot 1} \cdot \left(\frac{0,165}{2} - 0,038 \right) - \frac{2}{3} \cdot 0 \cdot 0 = 0,0417 \text{ м} = 41,7 \text{ мм}$$

Высота ярма ротора для двухполюсных двигателей с непосредственно посадкой сердечника ротора на вал определяется по (9.126)

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

$$h_j = \frac{0,1648 - 0,0741}{2} - 0,038 = 7,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора по (9.125)

$$L_j = 2 \cdot h_j \quad (4.16)$$

$$L_j = 2 \cdot 7,4 \cdot 10^{-3} = 0,0148 \text{ м}$$

Расчетная индукция в ярме ротора по (9.122)

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

$$B_j = \frac{0,0157}{2 \cdot 0,0417 \cdot 0,13 \cdot 0,97} = 1,49 \text{ Тл}$$

по [1, П.1.6] находим $H_j = 510 \frac{\text{А}}{\text{м}}$

Магнитное напряжение ярма ротора по (9.121)

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

$$F_j = 0,128 \cdot 510 = 65,28 \text{ А}$$

Магнитное напряжение на пару полюсов (по 9.128)

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

$$F_{\Sigma} = 1403,62 + 55,4 + 164,8 + 174,36 + 65,28 = 1863,46 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи по (9.129)

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

$$k_{\mu} = \frac{1863,46}{1403,62} = 1,33$$

Намагничивающий ток по (9.130)

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

$$I_{\mu} = 1 \cdot \frac{1863,46}{0,9 \cdot 3 \cdot 65 \cdot 0,91} = 11,67 \text{ А}$$

Относительное значение по (9.131)

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

$$I_{*\mu} = \frac{11,67}{69,21} = 0,169$$

Параметры рабочего режима

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура

$$v_{расч} = 115 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

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 $\beta = 0,8$

Средняя ширина катушки по (9.138)

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

$$b_{кт} = 3,14 \cdot \frac{0,167 + 0,033}{2} \cdot 0,8 = 0,251 \text{ м}$$

Катушки всыпной обмотки статора

Определяем при $2p = 2$ по [1, табл. 9.23] $K_L = 1,2$; $K_{выл} = 0,26$; $B = 0,01 \text{ м}$

Длина лобовой части по (9.136)

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

$$\ell_{л} = 1,2 \cdot 0,251 + 0,01 = 0,3112 \text{ м}$$

Длина вылета лобовой части катушки по (9.137)

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

$$\ell_{\text{выл}} = 0,26 \cdot 0,251 + 0,01 = 0,07526 \text{ м}$$

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

$$\ell_{п} = \ell_1 = 0,13 \text{ м}$$

Средняя длина витка обмотки

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

$$\ell_{\text{ср}} = 2 \cdot (0,13 + 0,3112) = 0,882 \text{ м}$$

Общая длина проводников фазы обмотки статора

$$L_1 = \ell_{\text{ср}} \cdot w_1 \quad (4.27)$$

$$L_1 = 0,882 \cdot 65 = 57,33 \text{ м}$$

Активное сопротивление обмотки статора по (9.132)

$$r_1 = k_R \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot 10^{-6} \cdot a} \quad (4.28)$$

$$r_1 = 1 \cdot 2,439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{57,33}{6,033 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,116 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.29)$$

$$r_{1*} = 0,116 \cdot \frac{69,21}{220} = 0,036 \text{ о. е.}$$

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)

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{\ell_{\text{ст2}}}{q_c \cdot 10^{-6}} \quad (4.30)$$

$$r_c = 4,878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0,13}{174,1 \cdot 10^{-6}} = 3,642 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Сопrotивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями

$$r_{\text{кл}} = \rho_{115} \cdot \pi \cdot D_{\text{кл.ср}} \cdot \frac{10^{-3}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}} \cdot 10^{-6}} \quad (4.31)$$

$$r_{\text{кл}} = 4,878 \cdot 10^{-8} \cdot 3,14 \cdot 118 \cdot \frac{10^{-3}}{38 \cdot 1222 \cdot 10^{-6}} = 3,894 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора по (9.168)

$$r_2 = r_c + 2 \cdot \frac{r_{\text{кл}}}{\Delta^2} \quad (4.32)$$

$$r_2 = 3,642 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 3,894 \cdot \frac{10^{-7}}{0,165^2} = 6,503 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad (4.33)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(3,14 \cdot \frac{1}{38}\right) = 0,165$$

Приводим сопротивление ротора к числу витков обмотки статора по (9.172), (9.173):

$$r'_2 = r_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(w_1 \cdot k_{061})^2}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}^2} \quad (4.34)$$

$$r'_2 = 6,503 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(65 \cdot 0,91)^2}{38 \cdot 1^2} = 0,072 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (4.35)$$

$$r'_{2*} = 0,072 \cdot \frac{69,21}{220} = 0,023 \text{ о. е.}$$

Далее определяем индуктивные сопротивления обмоток

$$K'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) \quad (4.36)$$

$$K'_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,8) = 0,85$$

$$K_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot K'_\beta) \quad (4.37)$$

$$K_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,85) = 0,888$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора по табл.

9.26, (см. рис. 9.50, е)

$$\lambda_{п1} = \frac{h_2}{3 \cdot b_1} \cdot K_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + 3 \cdot \frac{h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) \cdot K'_\beta \quad (4.38)$$

$$\lambda_{п1} = \frac{28,1}{3 \cdot 10,1} \cdot 0,888 + \left(\frac{0}{10,1} + 3 \cdot \frac{3,05}{10,1 + 2 \cdot 4} + \frac{1}{4} \right) \cdot 0,85 = 1,466$$

$$h_2 = h_{п.к} - 2 \cdot b_{из} \quad (4.39)$$

$$h_2 = 28,9 - 2 \cdot 0,4 = 28,1 \text{ мм}$$

$$h_k = 0,5 \cdot (b_1 - b_{ш}) \quad (4.40)$$

$$h_k = 0,5 \cdot (10,1 - 4) = 3,05 \text{ мм}$$

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

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния статора по

(9.159)

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q}{\ell_\delta} \cdot (\ell_l - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) \quad (4.41)$$

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{5}{0,15} \cdot (0,3112 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,262) = 2,007$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмоток статора по (9.160)

$$\lambda_{д1} = t_{z1} \cdot \frac{10^3}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \varepsilon_1 \quad (4.42)$$

$$\lambda_{д1} = 0,0175 \cdot \frac{10^3}{12 \cdot 1,1 \cdot 1,11} \cdot 0,83 = 0,99$$

При полузакрытых или полуоткрытых пазах статора с учетом скоса пазов по

(9.176) $k'_{ск} = 0,75$

$$\varepsilon = 2 \cdot k'_{ск} \cdot K_\beta - k_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ск}^2) \quad (4.43)$$

$$\varepsilon = 2 \cdot 0,75 \cdot 0,888 - 0,91^2 \cdot \left(\frac{13,6}{17,5} \right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 0,83$$

Расчетная длина магнитопровода для обмотки статора по (9.153)

$$l'_\delta = \ell_1 - 0,5 \cdot n_k \cdot b_k \quad (4.44)$$

$$l'_\delta = 0,13 - 0,5 \cdot 0 \cdot 0,01 = 0,13$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора по (9.152)

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}) \quad (4.45)$$

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{65}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,13}{1 \cdot 5} \cdot (1,466 + 2,007 + 0,99) = 0,387$$

Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} \quad (4.46)$$

$$x_{1*} = 0,387 \cdot \frac{69,21}{220} = 0,122$$

При расчете номинального режима двигателя во всех формулах

ем $k_d = 1$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора по

[1, табл. 9.27]

$$\lambda_{\text{п2}} = \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c}\right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{ш}}}{2 \cdot b_1} \cdot k_d + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \quad (4.47)$$

$$\lambda_{\text{п2}} = \frac{32,28}{3 \cdot 7,4} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot 7,4^2}{8 \cdot 174,1}\right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,4} \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} = 2,142$$

$$h_0 = h_1 + 0,4 \cdot b_2 \quad (4.48)$$

$$h_0 = 31,4 + 0,4 \cdot 2,2 = 32,28 \text{ мм}$$

$$I_2 = 594,71 \text{ А}$$

Коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) \quad (4.49)$$

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(3,14 \cdot \frac{1}{38}\right) = 0,165$$

Расчетная длина магнитопровода для обмотки ротора по (9.154)

$$l'_\delta = \ell_{\text{ст2}} - 0,5 \cdot n_k \cdot b_k \quad (4.50)$$

так как охлаждающие каналы отсутствуют имеем

$$l'_\delta = 0,13 - 0,5 \cdot 0 \cdot 0 = 0,13 \text{ м}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния ротора по (9.178)

$$\lambda_{л2} = 2.3 \cdot \frac{D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \left(4.7 \cdot \frac{D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + 2 \cdot b_{\text{кл}}} \right) \quad (4.51)$$

$$\lambda_{л2} = 2.3 \cdot \frac{0,118}{38 \cdot 0,13 \cdot 0,165^2} \cdot \lg \left(4.7 \cdot \frac{0,118}{0,047 + 2 \cdot 0,026} \right) = 1,51$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора по (9.180)

$$\lambda_{д2} = t_{z2} \cdot \frac{\varepsilon_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \quad (4.52)$$

$$\lambda_{д2} = 13,6 \cdot \frac{0,99}{12 \cdot 1,1 \cdot 1,11} = 0,92$$

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

$$\varepsilon_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_{z2}}{1 - \left(\frac{p}{Z_2} \right)^2} \quad (4.53)$$

$$\varepsilon_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(3,14 \cdot \frac{1}{38} \right)^2 - \frac{0,01}{1 - \left(\frac{1}{38} \right)^2} = 0,99$$

$$\lambda_{\text{ск}} = 0$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по (9.177)

$$x_2 = 7.9 \cdot f_1 \cdot l'_\delta \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{л2} + \lambda_{д2} + \lambda_{\text{ск}}) \quad (4.54)$$

$$x_2 = 7.9 \cdot 50 \cdot 0,13 \cdot 10^{-6} \cdot (2,142 + 1,51 + 0,92 + 0) = 2,35 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

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

$$x'_2 = x_2 \cdot 4 \cdot m \cdot \frac{(w_1 \cdot k_{\text{об1}})^2}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}^2} \quad (4.55)$$

$$x'_2 = 2,35 \cdot 10^{-4} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(65 \cdot 0,91)^2}{38 \cdot 1^2} = 0,26 \text{ Ом}$$

Относительное значение

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} \quad (4.56)$$

$$x'_{2*} = 0,26 \cdot \frac{69,21}{220} = 0,082$$

Расчет потерь

Потери в стали основные по (9.187)

$$P_{\text{ст.осн}} = \rho_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^2 \cdot (\kappa_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + \kappa_{\text{дз}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \quad (4.57)$$

$$P_{\text{ст.осн}} = 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot (1,6 \cdot 1,4^2 \cdot 38,16 + 1,8 \cdot 1,75^2 \cdot 7,98) = 409,15 \text{ Вт}$$

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)

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot K_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad (4.58)$$

$$m_a = 3,14 \cdot (0,322 - 0,0445) \cdot 0,0445 \cdot 0,13 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 38,16 \text{ кг}$$

Масса стали зубцов статора по (9.189)

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot 10^{-3} \cdot Z_1 \cdot \ell_{\text{ст1}} \cdot K_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad (4.59)$$

$$m_{z1} = 0,033 \cdot 8,2 \cdot 10^{-3} \cdot 30 \cdot 0,13 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 7,98 \text{ кг}$$

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

Поверхностные потери в роторе по (9.194)

$$P_{\text{пов2}} = P_{\text{пов2уд}} \cdot (t_{z2} - b_{\text{ш}}) \cdot Z_2 \cdot \ell_{\text{ст2}} \cdot 10^{-3} \quad (4.60)$$

$$P_{\text{пов2}} = 231 \cdot (13,6 - 1,5) \cdot 38 \cdot 0,13 \cdot 10^{-3} = 13,81 \text{ Вт}$$

Удельные поверхностные потери по (9.192)

$$P_{\text{пов2уд}} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(Z_1 \cdot \frac{n_0}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 \quad (4.61)$$

$$P_{\text{пов2уд}} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(30 \cdot \frac{3000}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,193 \cdot 0,0175 \cdot 10^3)^2 = 231 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

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)

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} \quad (4.62)$$

$$B_{02} = 0,24 \cdot 1,11 \cdot 0,723 = 0,193 \text{ Тл}$$

Для зубцов ротора определяем отношение $\frac{b_{\text{ш}}}{\delta} = 3,6$

тогда по [1,рис. 9.53] находим $\beta_{02} = 0,24$

Пульсационные потери в зубцах ротора по (9.200)

$$P_{\text{пул}2} = 0,11 \cdot \left(Z_1 \cdot \frac{n_0}{1000} \cdot B_{\text{пул}2} \right)^2 \cdot m_{z2} \quad (4.63)$$

$$P_{\text{пул}2} = 0,11 \cdot \left(30 \cdot \frac{3000}{1000} \cdot 0,118 \right)^2 \cdot 7,49 = 92,9 \text{ Вт}$$

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

$$B_{\text{пул}2} = \gamma_1 \cdot \frac{\delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B'_{z2} \quad (4.64)$$

$$B_{\text{пул}2} = 1,53 \cdot \frac{1,1}{2 \cdot 13,6} \cdot 1,91 = 0,118 \text{ Тл}$$

Масса стали зубцов ротора по (9.201)

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot 10^{-3} \cdot \ell_{\text{ст}2} \cdot K_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \quad (4.65)$$

$$m_{z2} = 38 \cdot 0,0378 \cdot 5,3 \cdot 10^{-3} \cdot 0,13 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 7,49 \text{ кг}$$

Поверхностные и пульсационные потери в статорах двигателей с короткозамкнутыми или фазными роторами со стержневой обмоткой обычно малы, поэтому расчет этих потерь в статорах таких двигателей не проводят [1].

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

Суммарные добавочные потери в стали по (9.202)

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов}1} + P_{\text{пул}1} + P_{\text{пов}2} + P_{\text{пул}2} \quad (4.66)$$

$$P_{\text{ст.доб}} = 0 + 0 + 13,81 + 92,9 = 106,7 \text{ Вт}$$

Полные потери в стали по (9.203)

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} \quad (4.67)$$

$$P_{\text{ст}} = 409,15 + 106,7 = 515,9 \text{ Вт}$$

Механические потери по (9.210)

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n_0}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 \quad (4.68)$$

$$P_{\text{мех}} = 1 \cdot \left(\frac{3000}{10}\right)^2 \cdot 0,322^4 = 967,5 \text{ Вт}$$

для двигателей с $2p = 2$

$$K_T = 1 \quad (4.69)$$

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

$$P_{\text{э1хх}} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 \quad (4.70)$$

$$P_{\text{э1хх}} = 3 \cdot 11,67^2 \cdot 0,116 = 47,4 \text{ Вт}$$

Ток холостого хода двигателя по (9.217)

$$I_{\text{хх}} = \sqrt{I_{\text{хха}}^2 + I_{\text{ххр}}^2} \quad (4.71)$$

$$I_{\text{хх}} = \sqrt{2,319^2 + 11,67^2} = 11,898 \text{ А}$$

где активная составляющая тока холостого хода по (9.218)

$$I_{\text{хха}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1хх}}}{m \cdot U_{1\text{ном}}} \quad (4.72)$$

$$I_{\text{хха}} = \frac{515,9 + 967,5 + 47,4}{3 \cdot 220} = 2,319 \text{ А}$$

Реактивная составляющая тока холостого хода по (9.220) $I_{\text{ххр}} = I_{\mu} = 11,67 \text{ А}$

Ток холостого хода в относительных единицах

$$I_{\text{хх}*} = \frac{I_{\text{хх}}}{I_{1\text{ном}}} \quad (4.73)$$

$$I_{\text{хх}*} = \frac{11,898}{69,21} = 0,17 \text{ о. е.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos\varphi_{\text{хх}} = \frac{I_{\text{хха}}}{I_{\text{хх}}} \quad (4.74)$$

$$\cos\varphi_{\text{хх}} = \frac{2,319}{11,898} = 0,195 \text{ о. е.}$$

5. Расчет параметров и построение рабочих и пусковых характеристик

Расчет рабочих характеристик

по (9.184)

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

$$r_{12} = \frac{409,15}{3 \cdot 11,67^2} = 1 \text{ Ом}$$

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

$$r_{12*} = 1 \cdot \frac{69,21}{220} = 0,31$$

по (9.185)

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

$$x_{12} = \frac{220}{11,67} - 0,387 = 18,46 \text{ Ом}$$

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

$$x_{12*} = 18,46 \cdot \frac{69,21}{220} = 5,81$$

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

$$\gamma = \arctg \left(\frac{0,116 \cdot 18,46 - 1 \cdot 0,387}{1 \cdot (0,116 + 1) + 18,46 \cdot (0,387 + 18,46)} \right) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ рад} = 0,29^\circ$$

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

по (9.223)

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

$$c_1 = 1 + \frac{0,387}{18,46} = 1,021$$

по (9.227)

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

$$a' = 1,021^2 = 1,042$$

$$b' = 0$$

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

$$a = 1,021 \cdot 0,116 = 0,118$$

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

$$b = 1,021 \cdot (0,387 + 1,021 \cdot 0,26) = 0,666$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения

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

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 515,9 + 967,5 = 1483,4 \text{ Вт}$$

Предварительно принимаем номинальное скольжение $s_{\text{НОМ}} = r_{2*}' = 0,023$

$$P_{2\text{НОМ}} = 37\text{кВт}; U_{1\text{НОМ}} = 220/380 \text{ В}; 2p = 2; I_{1\text{НОМ}} = 69,21 \text{ А}$$

$$I_{2\text{НОМ}}' = 342,42 \text{ А}; x_1 = 0,387 \text{ Ом}; x_2' = 0,26 \text{ Ом}; x_{12\text{П}} = 24,55 \text{ Ом};$$

$$c_{1\text{П}} = 1,02; r_1 = 0,116 \text{ Ом}; r_2' = 0,072 \text{ Ом}; s_{\text{НОМ}} = 0,023.$$

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	15,005	7,5024	5,0016	3,7512	3,001	3,4258
2	$b' \cdot r_2' / s$	Ом	0,2016	0,1008	0,0672	0,0504	0,0403	0,046
3	$R = a + a' \cdot r_2' / s$	Ом	15,117	7,6144	5,1136	3,8632	3,113	3,5378
4	$X = b + b' \cdot r_2' / s$	Ом	0,8686	0,7678	0,7342	0,7174	0,7073	0,713
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	15,142	7,653	5,166	3,9292	3,1923	3,6089
6	$I_2'' = U_{1H} / Z$	А	14,529	28,747	42,586	55,99	68,916	60,961
7	$\cos \varphi_2' = R / Z$	о.е.	0,9984	0,995	0,9898	0,9832	0,9751	0,9803
8	$\sin \varphi_2' = X / Z$	о.е.	0,0574	0,1003	0,1421	0,1826	0,2216	0,1976
9	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$	А	16,825	30,922	44,474	57,369	69,523	62,079
10	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$	А	12,503	14,554	17,722	21,893	26,94	23,714
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	20,963	34,176	47,875	61,405	74,56	66,454
12	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	А	14,834	29,351	43,48	57,166	70,363	62,241
13	$P_1 = 3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	11,105	20,408	29,353	37,864	45,885	40,972
14	$P_{\Sigma 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,1529	0,4065	0,7976	1,3121	1,9346	1,5368
15	$P_{\Sigma 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,0475	0,1861	0,4084	0,7059	1,0694	0,8368
16	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} (I_1 / I_{1H})^2$	кВт	0,0098	0,026	0,0511	0,084	0,1238	0,0984
17	$\Sigma P = P_{\text{СТ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{ДОБ}}$	кВт	1,6936	2,1019	2,7404	3,5854	4,6112	3,9554
18	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт	9,4112	18,306	26,612	34,278	41,274	37,017
19	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	о.е.	0,847	0,897	0,907	0,905	0,900	0,9035
20	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	о.е.	0,803	0,905	0,929	0,934	0,932	0,9342

По результатам расчетов рабочих характеристик уточняем параметры двигателя $s_{\text{НОМ}} = 0,0219$ о.е.; $\eta_{\text{Н}} = 0,9$ о.е.; $\cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,93$ о.е.;

$I_{2\text{Н}}' = 62,24$ А; $I_{1\text{Н}} = 66,45$ А

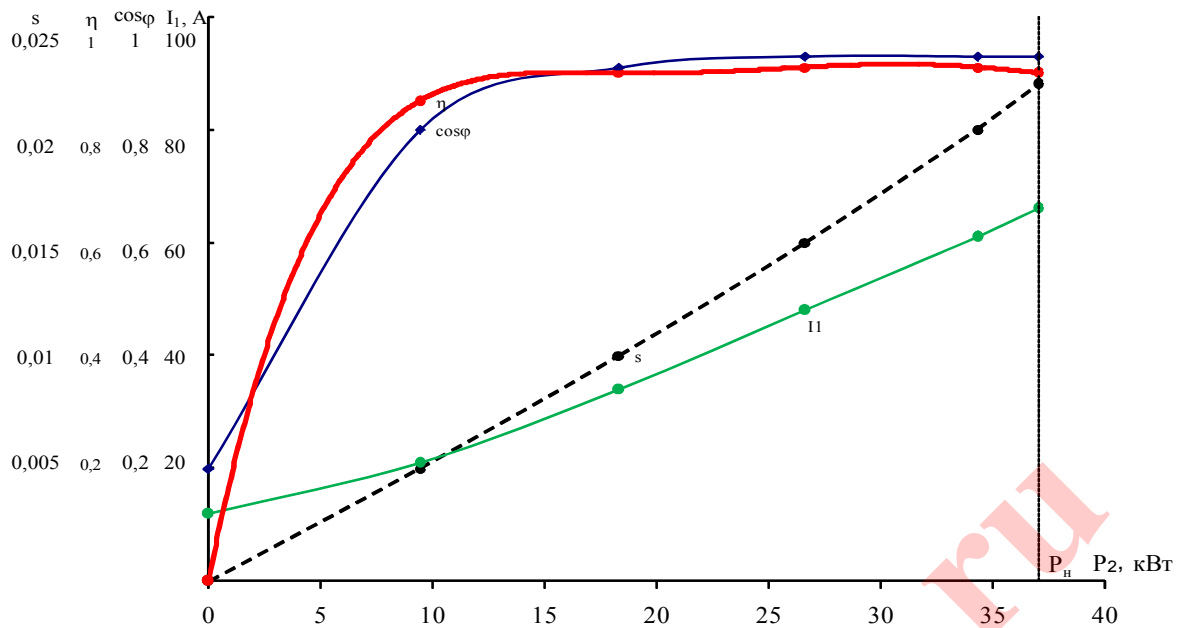


Рисунок 5.1 –Рабочие характеристики

Расчет пусковых характеристик

Производим подробный расчет для скольжения $s=1$

Высота стержня в пазу ротора

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

$$h_c = 37,9 - (0,7 + 1) = 36,2 \text{ мм}$$

Приведенная высота стержня по (9.245) при 115°C

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

$$\xi = 63,61 \cdot 36,2 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1} = 2,3$$

по [1, рис. 9.57] находим $\varphi = 1,24$

Соответственно глубина проникновения тока

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

$$h_r = \frac{36,2}{1 + 1,24} = 16,16 \text{ мм}$$

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

$$b_r = 7,4 - \frac{7,4 - 2,2}{31,4} \cdot \left(16,16 - \frac{7,4}{2} \right) = 5,34 \text{ мм}$$

Площадь сечения стержня определяем по (9.253)

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

$$q_r = 3,14 \cdot \frac{7,4^2}{8} + \frac{7,4 + 5,34}{2} \cdot \left(16,16 - \frac{7,4}{2} \right) = 100,87 \text{ мм}^2$$

по (9.247)

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

$$k_r = \frac{174,1}{100,87} = 1,726$$

по (9.257)

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

$$K_R = 1 + \frac{3,642 \cdot 10^{-5}}{6,5} \cdot 10^{-5} \cdot (1,726 - 1) = 1,407$$

$$r'_c = r_c = 3,642 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

$$r'_{2e} = K_R \cdot r'_2 \quad (5.18)$$

$$r'_{2e} = 1,407 \cdot 0,072 = 0,101 \text{ Ом}$$

по рис. 9.58 $\varphi' = 0,66$; $\kappa_d = \varphi' = 0,66$

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

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

$$\lambda'_{п2} = \frac{32,28}{3 \cdot 7,4} \cdot \left(1 - 3,14 \cdot \frac{7,4^2}{8 \cdot 174,1} + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 7,4} \right) = 2,087$$

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

$$\Delta\lambda'_{п2}\xi = 2,087 \cdot (1 - 0,66) = 0,71$$

тогда

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

$$\lambda'_{п2}\xi = 1,51 - 0,71 = 0,8$$

по (9.262)

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

$$K_x = \frac{0,8 + 1,51 + 0,92}{1,51 + 1,51 + 0,92} = 0,82$$

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

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

$$x'_{2\xi} = 0,26 \cdot 0,82 = 0,213$$

Пусковые параметры по (9.277) и (9.278)

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

$$x_{12п} = 1,33 \cdot 18,46 = 24,55 \text{ Ом}$$

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

$$c_{1п} = 1 + \frac{0,387}{24,55} = 1,02$$

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

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

$$R_{п} = 0,116 + 1,02 \cdot \frac{0,101}{1} = 0,219 \text{ Ом}$$

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

$$X_{п} = 0,387 + 1,02 \cdot 0,213 = 0,604 \text{ Ом}$$

по (9.281)

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

$$I'_2 = \frac{220}{\sqrt{0,219^2 + 0,604^2}} = 342,42 \text{ А}$$

по (9.283)

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

$$I_{1п} = 342,42 \cdot \frac{\sqrt{0,219^2 + (0,604 + 24,55)^2}}{1,02 \cdot 24,55} = 343,98 \text{ А}$$

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 $k_{нас} = 1,2$

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

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

$$F_{п.ср} = 0,7 \cdot \frac{1,2 \cdot 343,98 \cdot 26}{2} \cdot \left(0,85 + 0,951 \cdot 0,91 \cdot \frac{30}{38} \right) = 5759,2 \text{ А}$$

по (9.265)

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} \quad (5.31)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1,1}{17,5 + 13,6}} = 1,11$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре по (9.264)

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{п.ср}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-3} \quad (5.32)$$

$$B_{\phi\delta} = \frac{5759,2}{1,6 \cdot 1,1 \cdot 1,11} \cdot 10^{-3} = 2,95 \text{ Тл}$$

По [1,рис. 9.61] находим $k_{\delta} = 0,74$

Значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора по (9.266)

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

$$c_{\varepsilon 1} = (17,5 - 4) \cdot (1 - 0,74) = 3,51 \text{ мм}$$

по (9.269)

$$\Delta\lambda'_{п1нас} = \frac{h_{ш} + 0,58 \cdot h_{к}}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{c_{\varepsilon 1} + 1,5 \cdot b_{ш}} \quad (5.34)$$

$$\Delta\lambda'_{п1нас} = \frac{1 + 0,58 \cdot 2,95}{1,5} \cdot \frac{3,51}{3,51 + 1,5 \cdot 1,5} = 1,101$$

$$h_k = \frac{b_1 - b_{ш}}{2} \quad (5.35)$$

$$h_k = \frac{7,4 - 1,5}{2} = 2,95 \text{ мм}$$

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

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

$$\lambda'_{п1нас} = 1,466 - 1,101 = 0,365$$

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

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

$$\lambda'_{д1нас} = 0,99 \cdot 0,74 = 0,733$$

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

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

$$x_{1нас} = 0,387 \cdot \frac{0,365 + 0,733 + 2,007}{1,466 + 0,99 + 2,007} = 0,269 \text{ Ом}$$

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

по (9.270)

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{ш}) \cdot (1 - k_{\delta}) \quad (5.39)$$

$$c_{\varepsilon 2} = (13,6 - 1,5) \cdot (1 - 0,74) = 3,146 \text{ мм}$$

по (9.271)

$$\Delta\lambda'_{п2нас} = \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{b_{ш} + c_{\varepsilon 2}} \quad (5.40)$$

$$\Delta\lambda'_{п2нас} = \frac{0,7}{1,5} \cdot \frac{3,146}{1,5 + 3,146} = 0,316$$

по (9.273)

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

$$\lambda'_{п2нас} = 1,51 - 0,316 = 1,194$$

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

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

$$\lambda'_{д2нас} = 0,92 \cdot 0,74 = 0,68$$

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

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

$$x'_{2\xiнас} = 0,26 \cdot \frac{1,194 + 0,68 + 1,51}{1,51 + 0,92 + 1,51} = 0,223 \text{ Ом}$$

по (9.278)

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

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{0,269}{24,55} = 1,011$$

Расчет токов и моментов:

по (9.280)

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

$$R_{пнас} = 0,116 + 1,011 \cdot \frac{0,101}{1} = 0,218 \text{ Ом}$$

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

$$X_{пнас} = 0,269 + 1,011 \cdot 0,223 = 0,494 \text{ Ом}$$

по (9.281)

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

$$I'_{2нас} = \frac{220}{\sqrt{0,218^2 + 0,494^2}} = 407,44 \text{ А}$$

по (9.283)

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

$$I_{1\text{пнас}} = 407,44 \cdot \frac{\sqrt{0,218^2 + (0,494 + 24,55)^2}}{1,011 \cdot 24,55} = 411,13 \text{ А}$$

Кратность пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения

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

$$I_{\text{п*}} = \frac{411,13}{69,21} = 5,94$$

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

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

$$M_{\text{п*}} = \left(\frac{407,44}{62,24} \right)^2 \cdot 1,407 \cdot \frac{0,0219}{1} = 1,32$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения

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

$$k'_{\text{нас}} = \frac{411,13}{343,98} = 1,2$$

Расхождение с предварительно принятым значением

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

$$\Delta = \frac{1,2 - 1,2}{1,2} \cdot 100 = 0 \%$$

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

Критическое скольжение предварительно по по (9.286)

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

$$S_{кр} = \frac{0,072}{\frac{0,387}{1,02} + 0,26} = 0,11$$

Критический(максимальный) момент $M_{макс*} = 2,61$

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	$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s}$	-	2,3	2,06	1,63	1,03	0,73	0,76
2	$\varphi = f(\xi)$	-	1,24	0,93	0,44	0,11	0,25	0,3
3	$h_r = h_c / (1 + \varphi)$	мм	16,16	18,76	25,14	32,61	28,96	27,85
4	$k_r = q_c / q_r$	-	1,726	1,525	1,225	1,048	1,119	1,146
5	$K_R = 1 + \frac{r_c'}{r_2'} (k_r - 1)$	-	1,407	1,294	1,126	1,027	1,067	1,082
6	$r_{2\xi}' = K_R r_2'$	Ом	0,101	0,093	0,081	0,074	0,077	0,078
7	$k_\phi = \phi'(\xi)$	-	0,66	0,73	0,85	0,96	0,97	0,97
8	$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta \lambda_{\Pi 2\xi}$	-	0,8	0,947	1,197	1,427	1,447	1,447
9	$K_x = \sum \lambda_{2\xi}' / \sum \lambda_2$	-	0,82	0,857	0,921	0,979	0,984	0,984
10	$x_{2\xi}' = K_x x_2'$	Ом	0,213	0,223	0,239	0,255	0,256	0,256
11	$R_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi} \frac{r_{2\xi}'}{s}$	Ом	0,219	0,235	0,281	0,493	0,901	0,839
12	$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} x_{2\xi}'$	Ом	0,604	0,614	0,631	0,647	0,648	0,648
13	$I_{2\Pi}' = U_{НОМ} / \sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}$	А	342,4	334,6	318,5	270,5	198,2	207,5
14	$I_{1\Pi}' = I_{2\Pi}' \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} x_{12\Pi}}$	А	344	336,3	320,3	272,2	199,6	209

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}	—	1,2	1,16	1,1	1,04	1,02	1,022
2	$F_{п.ср} = 0,7 \frac{I_1 k_{нас} u_n}{a} (k'_\beta + k_{\gamma 1} k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2})$	А	5759	5443	4916	3950	2841	2980
3	$B_{Ф\delta} = F_{п.ср} 10^{-6} / (1,6 \delta C_N)$	Тл	2,95	2,79	2,52	2,02	1,45	1,53
4	k _δ = f (B _{Фδ})	—	0,74	0,76	0,8	0,87	0,94	0,93
5	c ₁ = (t _{z1} - b _ш)(1 - k _δ)	мм	3,51	3,24	2,7	1,755	0,81	0,945
6	$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta \lambda_{п1нас}$	—	0,365	0,399	0,48	0,674	0,988	0,931
7	$\lambda_{Д1нас} = k_\delta \lambda_{Д1}$	—	0,733	0,752	0,792	0,861	0,931	0,921
8	$X_{1нас} = x_1 \sum \lambda_{1нас} / \sum \lambda_1$	Ом	0,269	0,274	0,284	0,307	0,34	0,335
9	c _{1п} = 1 + X _{1нас} / X _{12п}	—	1,011	1,011	1,012	1,013	1,014	1,014
10	c ₂ = (t _{z2} - b _{ш2})(1 - k _δ)	мм	3,146	2,904	2,42	1,573	0,726	0,847
11	$\lambda_{п2\xiнас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta \lambda_{п2нас}$	—	1,194	1,202	1,222	1,271	1,358	1,342
12	$\lambda_{Д2нас} = k_\delta \lambda_{Д2}$	—	0,68	0,7	0,74	0,8	0,86	0,86
13	$X'_{2\xiнас} = x'_2 \sum \lambda_{2\xiнас} / \sum \lambda_2$	Ом	0,223	0,225	0,229	0,236	0,246	0,245
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} r'_2 \xi / s$	Ом	0,218	0,234	0,28	0,491	0,897	0,835
15	$X_{п.нас} = X_{1нас} + c_{1п.нас} X'_{2\xiнас}$	Ом	0,494	0,501	0,516	0,546	0,589	0,583
16	$I'_{2нас} = U_1 / \sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}$	А	407,4	397,9	374,7	299,6	205	216
17	$I_{1нас} = I'_{2нас} \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} x_{12п}}$	А	411,1	401,6	378,1	302,4	207,2	218,2
18	k'нас = I _{1нас} / I _{1п}	—	1,2	1,19	1,18	1,11	1,04	1,04
19	I _{1*} = I _{1нас} / I _{1ном}	—	5,94	5,8	5,46	4,37	2,99	3,15
20	$M^* = \left(\frac{I'_{2нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{S_{ном}}{S}$	—	1,32	1,45	1,79	2,61	2,54	2,6

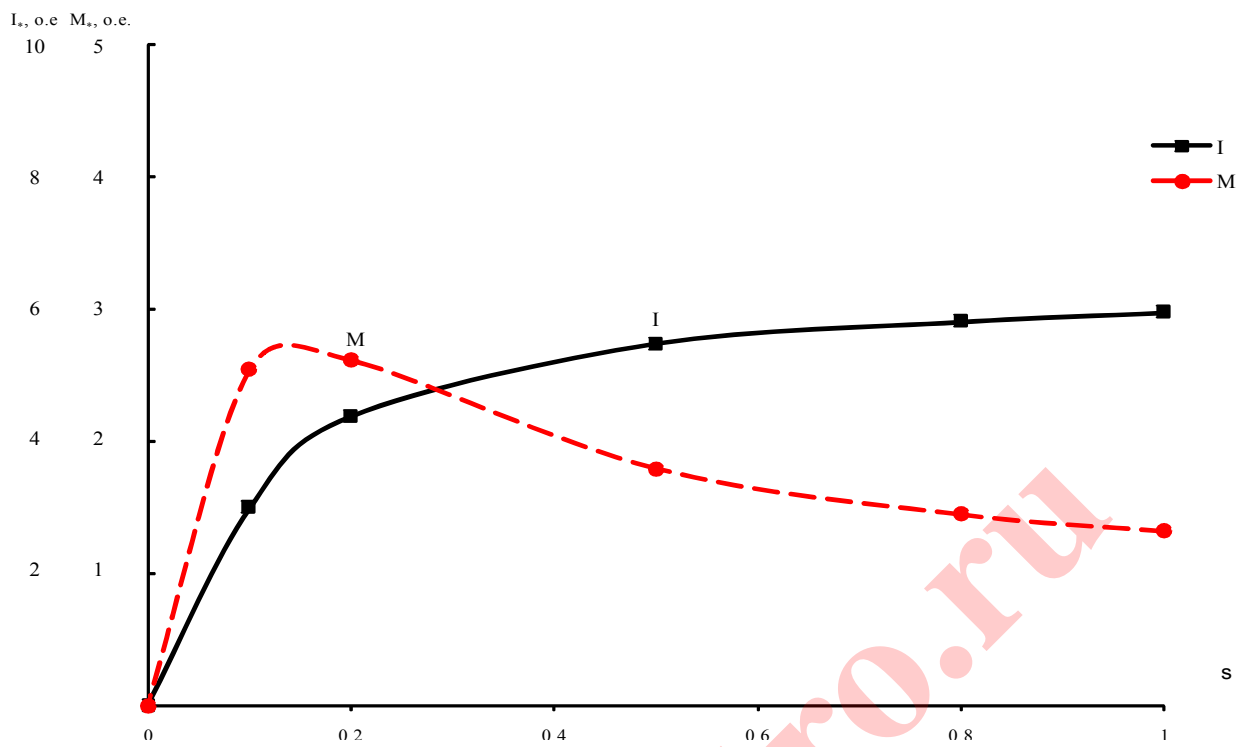


Рисунок 5.2 – Пусковые характеристики

diplom-electro.ru

6. Тепловой расчет

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

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

$$\Delta u_{\text{пов1}} = 0,84 \cdot \frac{484,7 + 409,15}{3,14 \cdot 0,167 \cdot 0,13 \cdot 160} = 68,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где по [1, табл. 9.35] $K = 0,84$

по (9.313)

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

$$P'_{\text{Эп}} = 1,07 \cdot 1536,8 \cdot 2 \cdot \frac{0,13}{0,882} = 484,7 \text{ Вт}$$

где из расчета рабочих характеристик находим при номинальном

нии $P_{\text{Э1}} = 1536,8 \text{ Вт}$

Определяем по [1, рис. 9.67] $\alpha_1 = 160 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot ^\circ\text{C}$

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)

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

$$\Delta u_{\text{изп1}} = \frac{484,7}{30 \cdot 0,0841 \cdot 0,13} \cdot \left(\frac{0,4}{0,16} + \frac{(10,1 + 16,2)}{16 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 5,43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

где расчетный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полу-

закрытых трапециевидальных пазов

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

$$\Pi_{\text{п1}} = 2 \cdot 28,9 + 10,1 + 16,2 = 84,1 \text{ мм} = 0,0841 \text{ м}$$

$$\frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{из}}} = \frac{1,6}{1,685} = 0,95 \quad (6.5)$$

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)

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

$$\Delta u_{\text{из.л1}} = \frac{1160,4}{2 \cdot 30 \cdot 0,0841 \cdot 0,3112} \cdot \left(\frac{0,05}{0,16} + \frac{33}{12 \cdot 1,4} \right) \cdot 10^{-3} = 1,68 \text{ °C}$$

где по (9.314)

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

$$P'_{\text{эл1}} = 1,07 \cdot 1536,8 \cdot 2 \cdot \frac{0,3112}{0,882} = 1160,4 \text{ Вт}$$

$$b_{\text{из.л1}} = 0,05 \text{ мм}; \quad \Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{п1}} = 0,0841 \text{ м}$$

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

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

$$\Delta u_{\text{пов.п1}} = \frac{0,84 \cdot 1160,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,167 \cdot 0,07526 \cdot 160} = 77,14 \text{ °C}$$

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

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

$$\Delta u'_{\text{пов.п1}} = \frac{(68,8 + 5,43) \cdot 2 \cdot 0,13 + (5,43 + 1,68) \cdot 2 \cdot 0,3112}{0,882} = 26,9 \text{ °C}$$

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

$$\Delta u_{\text{в}} = \frac{\Sigma P'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{в}}} \quad (6.10)$$

$$\Delta u_B = \frac{3107,74}{1,07 \cdot 50} = 58,09 \text{ } ^\circ\text{C}$$

по (9.326)

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

$$\Sigma P'_B = 4121,51 - (1 - 0,84) \cdot (484,7 + 409,15) - 0,9 \cdot 967,5 = 3107,74 \text{ Вт}$$

где по (9.324)

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{Э1}} + P_{\text{Э2}}) \quad (6.12)$$

$$\Sigma P' = 3955,36 + (1,07 - 1) \cdot (1536,8 + 836,8) = 4121,51 \text{ Вт}$$

из расчета рабочих характеристик при номинальном скольжении

ем $\Sigma P = 3955,36 \text{ Вт}$

по (9.327)

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

$$S_{\text{кор}} = (3,14 \cdot 0,322 + 8 \cdot 0,35) \cdot (0,13 + 2 \cdot 0,07526) = 1,07 \text{ м}^2$$

где по [1,рис. 9.70] для $h = 180 \text{ мм}$ $\Pi_p = 0,35 \text{ м}$

по [1,рис. 9.67] $\alpha_B = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \cdot ^\circ\text{C}$

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

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

$$\Delta u_1 = 26,9 + 58,09 = 84,99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Проверка условий охлаждения двигателя.

Требуемый для охлаждения расход воздуха по (9.340)

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

$$Q_B = 10,26 \cdot \frac{3107,74}{1100 \cdot 58,09} = 0,499 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

где по (9.341)

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

$$k_m = 3,3 \cdot \sqrt{\frac{3000}{100}} \cdot 0,322 = 10,26$$

где коэффициент $m' = 3,3$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (9.342)

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

$$Q'_B = 0,6 \cdot 0,322^3 \cdot \frac{3000}{100} = 0,601 \frac{M^3}{c}$$

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 типовыми параметрами двигателей серии 4А согласно заданию на проектирование. .

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	0,9	0,93	5,94	1,32	2,61
Задание на проектирование	0,8-0,9	0,85-0,9	6-7	1,2-2	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