

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Северо-Казахстанский государственный университет им. М. Козыбаева
Факультет энергетики и машиностроения
Кафедра энергетики и приборостроения
КУРСОВАЯ РАБОТА

На тему: «Проектирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»
по дисциплине – «Электрические машины»

Выполнил Калантырев
Научный руководитель
д.т.н., проф. Н.В. Шатковская

Петропавловск 2010

Содержание

Введение

1. Выбор главных размеров
2. Определение числа пазов статора, витков в фазе обмотки сечения провода обмотки статора
3. Расчёт размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора
4. Расчёт ротора
5. Расчёт магнитной цепи
6. Параметры рабочего режима
7. Расчёт потерь
8. Расчёт рабочих характеристик
9. Тепловой расчёт
10. Расчёт рабочих характеристик по круговой диаграмме

Приложение А

Заключение

Список литературы

Введение

Асинхронные двигатели являются основными преобразователями электрической энергии в механическую и составляют основу электропривода большинства механизмов. Серия 4А охватывает диапазон номинальных мощностей от 0,06 до 400 кВт и имеет 17 высот оси вращения от 50 до 355 мм.

В данном курсовом проекте рассматривается следующий двигатель:

- исполнение по степени защиты: IP23;
- способ охлаждения: IC0141.

Конструктивное исполнение по способу монтажа: IM1081 – по первой цифре – двигатель на лапах, с подшипниковыми щитами; по второй и третьей цифрам – с горизонтальным расположением вала и нижним расположением лап; по четвертой цифре – с одним цилиндрическим концом вала.

Климатические условия работы: УЗ – по букве – для умеренного климата; по цифре – для размещения в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры и влажности воздуха, воздействия песка и пыли, солнечной радиации существенно меньше, чем на открытом воздухе каменные, бетонные, деревянные и другие, не отапливаемые помещения.

1. Выбор главных размеров

1.1 Определим число пар полюсов:

$$p = \frac{60 \cdot f_1}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{600} = 5 \quad (1.1)$$

Тогда число полюсов $2p = 10$.

1.2 Определим высоту оси вращения графически: [1] по рисунку 9.18, б $h = 315 \text{ мм}$, в соответствии с $h = 315 \text{ мм}$, по [1] таблице 9.8 определим соответствующий оси вращения наружный диаметр $D_a = 590 \text{ мм}$.

1.3 Внутренний диаметр статора D , вычислим по формуле:

$$D = k_D \cdot D_a, \quad (1.2)$$

где k_D – коэффициент определяемый по [1] таблице 9.9.

При $2p=10$ k_D лежит в промежутке: $k_D \in [0,75 \div 0,77]$.

Выберем значение $k_D = 0,76$, тогда

$$D = 0,76 \cdot 590 = 448 \text{ мм}$$

1.4 Определим полюсное деление τ :

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{\pi \cdot 448}{10} = 141 \text{ мм} \quad (1.3)$$

1.5 Определим расчётную мощность P' , Вт:

$$P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi}, \quad (1.4)$$

где P' – мощность на валу двигателя, Вт;

k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, которое может быть приближенно определено [1] по рисунку 9.20. При $D_a = 0,59i$ и $2p=10$, $k_E = 0,96$.

Приближенные значения η и $\cos \varphi$ возьмём по кривым, построенным по данным двигателей серии 4А. [1] рисунок 9.21, в. При $P_2 = 110$ кВт и $2p=10$, $\eta = 93\%$, а $\cos \varphi = 0,83$

$$P' = 110000 \cdot \frac{0,96}{0,93 \cdot 0,83} = 136805 \text{ Вт}$$

1.6 Электромагнитные нагрузки A и B_s определим графически по кривым [1] рисунок 9.23, б. При $P_2 = 110$ кВт и $2p=10$, $A = 42 \cdot 10^3 \text{ А/м}$, $B_s = 0,844$ Тл.

1.7 Обмоточный коэффициент k_{os1} . Для двухслойных обмоток при $2p > 2$ следует принимать $k_{os1} = 0,91$ – $0,92$. Примем $k_{os1} = 0,91$.

1.8 Определим синхронную угловую скорость вала двигателя Ω :

$$\Omega = 2\pi \cdot \frac{n_1}{60} = 2\pi \cdot \frac{600 \text{ об/мин}}{60} = 62,8 \text{ рад/с} \quad (1.5)$$

где n_1 – синхронная частота вращения.

1.9 Рассчитаем длину воздушного зазора l_s :

$$l_s = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{os1} A B_s}, \quad (1.6)$$

где k_B – коэффициент формы поля. $k_B = 1,11$.

$$l_s = \frac{136805}{0,448^2 \cdot 62,8 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 42 \cdot 10^3 \cdot 0,844} = 0,303 \text{ м}$$

1.10 Критерием правильности выбора главных размеров D и l_s служит отношение $\lambda = l_s / \tau$, которое должно находиться в допустимых пределах [1] рисунок 9.25, б.

$$\lambda = \frac{0,303}{0,141} = 2,15$$

. Значение λ лежит в рекомендуемых пределах, значит главные размеры определены верно.

2. Определение числа пазов статора, витков в фазе обмотки и сечения провода обмотки статора

2.1 Определим предельные значения: $t_{1\max}$ и $t_{1\min}$ [1] рисунок 9.26. При $\tau = 141\text{мм}$ и $h = 315\text{мм}$, $t_{1\max} = 16,3\text{мм}$, $t_{1\min} = 14,1\text{мм}$.

2.2 Число пазов статора:

$$Z_{1\min} = \frac{\pi D}{t_{1\max}} = \frac{\pi \cdot 448}{16,3} = 86, \quad (2.1)$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi D}{t_{1\min}} = \frac{\pi \cdot 448}{14,1} = 100 \quad (2.2)$$

Окончательно число пазов должно быть кратным значению числа пазов на полюс и фазу: q .

Примем $Z_1 = 90$, тогда

$$q = \frac{Z_1}{2pm} = \frac{90}{10 \cdot 3} = 3, \quad (2.3)$$

где m - число фаз.

2.3 Окончательно определяем зубцовое деление статора:

$$t_1 = \frac{\pi D}{2pmq} = \frac{\pi \cdot 448}{10 \cdot 3 \cdot 3} = 15,6\text{мм} \quad (2.4)$$

2.4 Предварительный ток обмотки статора

$$I_{1H} = \frac{P_2}{mU_{1H} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{110000}{3 \cdot 220 \cdot 0,83 \cdot 0,93} = 216\text{А} \quad (2.5)$$

2.5 Число эффективных проводников в пазу (при условии $\dot{a} = 1$):

$$u'_i = \frac{\pi D A}{I_{1H} \cdot Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,448 \cdot 42 \cdot 10^3}{216 \cdot 90} = 3 \quad (2.6)$$

2.6 Принимаем число параллельных ветвей $\dot{a} = 2$, тогда

$$u_i = \dot{a} u'_i = 2 \cdot 3 = 6 \quad (2.7)$$

2.7 Окончательное число витков в фазе обмотки и магнитный поток Φ :

$$\omega_1 = \frac{u_i Z_1}{2am} = \frac{6 \cdot 90}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 45, \quad (2.8)$$

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1H}}{4k_B \cdot \omega_1 \cdot k_{\text{св}} \cdot f_1} = \frac{0,96 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 45 \cdot 0,91 \cdot 50} = 0,02332\text{Вб} \quad (2.9)$$

2.8 Определим значения электрических и магнитных нагрузок:

$$A = \frac{2I_{1H}\omega_1 m}{\pi D} = \frac{2 \cdot 216 \cdot 45 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,448} = 41458\text{А/м} \quad (2.10)$$

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_\delta} = \frac{5 \cdot 0,02332}{0,448 \cdot 0,303} = 0,859\text{Тл} \quad (2.11)$$

Значения электрической и магнитных нагрузок незначительно отличаются от выбранных графически.

2.9 Выбор допустимой плотности тока производится с учётом линейной нагрузки двигателя:

$$J_1 = \frac{AJ}{A}, (2.12)$$

где AJ - нагрев пазовой части обмотки статора, определим графически [1] рисунок 9.27, д.
При $D_a = 0,59 \text{ м}$ $AJ = 190 \cdot 10^9 \text{ А}^2 / \text{м}^3$.

$$J_1 = \frac{190 \cdot 10^9}{41,458 \cdot 10^3} = 4,58 \cdot 10^6 \text{ А} / \text{м}^2$$

2.10 Рассчитаем площадь сечения эффективных проводников:

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1H}}{aJ_1} = \frac{216}{2 \cdot 4,58 \cdot 10^6} = 23,58 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (2.13)$$

Принимаем $n_{\text{эф}} = 5$, тогда [1] таблица П-3.1 $q_{\text{эф}} = 4,36 \text{ мм}^2$, $d_{\text{эф}} = 2,36 \text{ мм}$, $d_{\text{из}} = 2,46 \text{ мм}$.
2.11 Окончательно определим плотность тока в обмотке статора:

$$J_1 = \frac{I_{1H}}{aq_{\text{эф}}n_{\text{эф}}} = \frac{216}{2 \cdot 4,36 \cdot 10^{-6} \cdot 5} = 4,9 \cdot 10^6 \text{ А} / \text{м}^2 \quad (2.14)$$

3. Расчёт размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

3.1 Предварительно выберем электромагнитные индукции в ярме статора B_{z1} и в зубцах статора B_a . При $2p = 10$ [1] таблица 9.12 $B_{z1} = 1,7 \text{ Тл}$, а $B_a = 1,15 \text{ Тл}$.

3.2 Выберем марку стали 2013 [1] таблица 9.13 и коэффициент заполнения сталью магнитопроводов статора и ротора $k_c = 0,97$.

3.3 По выбранным индукциям определим высоту ярма статора h_a и минимальную ширину зубца b_{z1}

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{\text{см1}} k_c} = \frac{0,02332}{2 \cdot 1,15 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 0,0345 \text{ м} \quad (3.1)$$

$$b_{z1} = \frac{B_z t_1 l_{\delta}}{B_{z1} l_{\text{см1}} k_c} = \frac{0,859 \cdot 0,0156 \cdot 0,303}{1,7 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 0,008 \text{ м} \quad (3.2)$$

3.4 Подберём высоту шлица $h_{\text{ш}}$ и ширину шлица $b_{\text{ш}}$ полузакрытого паза. Для двигателей с высотой оси $h \geq 160 \text{ мм}$, $h_{\text{ш}} = 1 \text{ мм}$. Ширину шлица выберем из таблицы 9.16 [1]. При $2p = 10$ и $h = 315 \text{ мм}$, $b_{\text{ш}} = 4 \text{ мм}$.

3.5 Определим размеры паза:
высоту паза:

$$h_{\pi} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0,59 - 0,448}{2} - 0,0345 = 0,0365 \text{ м} \quad (3.3)$$

размеры паза в штампе b_1 и b_2 :

Выберем $\beta = 30^\circ$, тогда

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{\pi})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0,448 + 0,073)}{90} - 0,008 = 0,0102 \text{ м} \quad (3.4)$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{ш}} - b_{\text{ш}} / \sqrt{3}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi / \sqrt{3}} =$$

$$= \frac{\pi(0,448 + 2 \cdot 0,001 - 0,004 / 1,732) - 90 \cdot 0,008}{90 - \pi / 1,732} = 0,0078 \text{ м} \quad , (3.5)$$

высоту клиновой части паза $h_{п.к}$:

$$h_{п.к} = h_{п.к} - (h_{ш} + \frac{b_1 - b_{ш}}{2}) = 0,0365 - (0,001 + \frac{0,0078 - 0,004}{2}) = 0,0336 \text{ м} \quad (3.6)$$

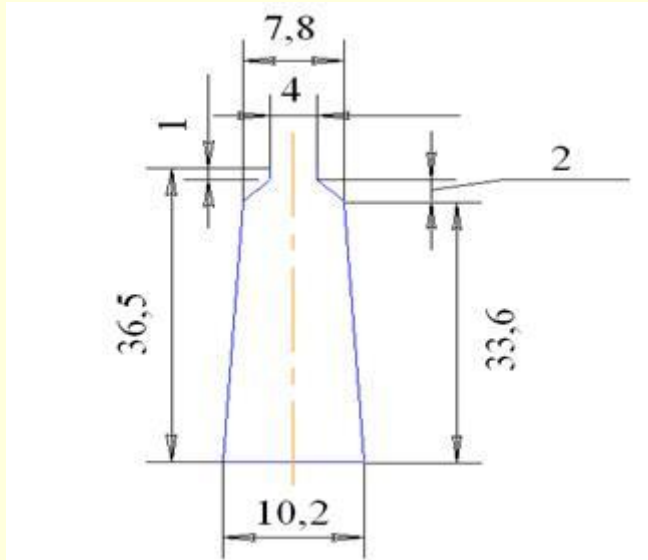


Рисунок 3.1. Паз спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором

3.6 Определим размеры паза в свету с учётом припусков на шихтовку и сборку сердечников: $\Delta b = 0,3 \text{ мм}$ и $\Delta h = 0,3 \text{ мм}$, таблица 9.14 [1]:

ширину, b'_1 и b'_2 :

$$b'_2 = b_2 - \Delta b = 10,2 - 0,3 = 9,9 \text{ мм} \quad , (3.7)$$

$$b'_1 = b_1 - \Delta b = 7,8 - 0,3 = 7,5 \text{ мм} \quad , (3.8)$$

и высоту $h'_{п.к}$:

$$h'_{п.к} = h_{п.к} - \Delta h = 33,6 - 0,3 = 33,3 \text{ мм} \quad (3.9)$$

Определим площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу:

$$S_{из} = b_{из} (2h_{п.к} + b'_1 + b'_2) \quad , (3.10)$$

где $b_{из}$ - односторонняя толщина изоляции в пазу, $b_{из} = 0,4 \text{ мм}$.

$$S_{из} = 0,4(2 \cdot 33,3 + 7,5 + 9,9) = 36,4 \text{ мм}^2$$

Расчитаем площадь поперечного сечения прокладок к пазу:

$$S_{пр} = 0,6 \cdot (b'_1 + b'_2) = 0,6 \cdot (7,5 + 9,9) = 10,8 \text{ мм}^2 \quad (3.11)$$

Определим площадь поперечного сечения паза для размещения проводников:

$$S'_{п} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{п.к} - S_{из} - S_{пр} = \frac{7,5 + 9,9}{2} \cdot 33,3 - 36,4 - 10,8 = 242,51 \text{ мм}^2 \quad (3.12)$$

3.7 Критерием правильности выбранных размеров служит коэффициент заполнения паза k_z , который приближённо равен $k_z = [0,72 \div 0,74]$.

$$k_z = \frac{d_{из}^2 u_i n_{из}}{S'_{п}} = \frac{2,46^2 \cdot 6 \cdot 5}{242,51} = 0,74 \quad , (3.13)$$

таким образом выбранные значения верны.

4. Расчёт ротора

4.1 Выберем высоту воздушного зазора d графически по [1] рисунок 9.31. При $2p = 10$ и $D = 0,448 \text{ м}$, $\delta = 0,7 \text{ мм}$.

4.2 Внешний диаметр короткозамкнутого ротора:

$$D_2 = D - 2\delta = 448 - 2 \cdot 0,7 = 446,6 \text{ мм} \quad (4.1)$$

4.3 Длина ротора равна длине воздушного зазора: $l_2 = l_\delta$, $l_2 = 0,303 \text{ м}$.

4.4 Число пазов выберем из таблицы 9.18 [1], $Z_2 = 108$.

4.5 Определяем величину зубцового деления ротора:

$$t_2 = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 446,6}{108} = 12,98 \text{ мм} \quad (4.2)$$

4.6 Значение коэффициента k_B для расчёта диаметра вала определим из таблицы 9.19 [1].

При $2p = 10$ и $h = 315 \text{ мм}$, $k_B = 0,23$.

Внутренний диаметр ротора равен:

$$D_j = k_B \cdot D_a = 0,23 \cdot 590 = 135,7 \text{ мм} \quad (4.3)$$

4.7 Определим ток в стержне ротора:

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i, \quad (4.4)$$

где k_i - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на отношение I_1/I_2 , определим графически при $\cos \varphi = 0,83$; $k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi = 0,864$;

v_i - коэффициент приведения токов, определим по формуле:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot \omega_1 \cdot k_{\text{ссл}}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 45 \cdot 0,91}{108} = 2,275 \quad (4.5)$$

Тогда искомый ток в стержне ротора:

$$I_2 = 0,864 \cdot 216 \cdot 2,275 = 425 \text{ А}$$

4.8 Определим площадь поперечного сечения стержня:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}, \quad (4.6)$$

где J_2 - допустимая плотность тока; в нашем случае $J_2 = 3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$.

$$q_c = \frac{425}{3 \cdot 10^6} = 141,7 \text{ мм}^2$$

4.9 Паз ротора определяем по рисунку 9.40, б [1]. Принимаем $b_g = 1,5 \text{ мм}$, $h_g = 0,7 \text{ мм}$, $h'_g = 0,3 \text{ мм}$.

Магнитную индукцию в зубце ротора B_{z2} выберем из промежутка $B_{z2} = 1,65 \div 1,9$ [1] таблица 9.12. Примем $B_{z2} = 1,9 \text{ Тл}$.

Определим допустимую ширину зубца:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta t_2 l_2}{B_{z2} l_{cm2} k_c} = \frac{0,859 \cdot 12,98 \cdot 0,303}{1,9 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 6,05 \text{ мм} \quad (4.7)$$

Расчитаем размеры паза:

ширину b_1 и b_2 :

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

$$= \frac{\pi(446,6 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 0,3) - 108 \cdot 6,05}{\pi + 108} = 6,72 \text{ мм} \quad , (4.8)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - q_c \cdot 4}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{6,72^2 \cdot \left(\frac{108}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 141,7 \cdot 4}{\frac{108}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = 5,42 \text{ мм} \quad , (4.9)$$

высоту h_1 :

$$h_1 = (b_1 - b_2) \frac{Z_2}{2\pi} = (6,72 - 5,42) \frac{108}{2\pi} = 22,36 \text{ мм} \quad (4.10)$$

Рассчитаем полную высоту паза ротора $h_{п2}$:

$$h_{п2} = h'_{ш} + h_{ш} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,3 + 0,7 + \frac{6,72}{2} + 22,36 + \frac{5,42}{2} = 29,43 \text{ мм} \quad (4.11)$$

Уточним площадь сечения стержня q_c :

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

$$= \frac{\pi}{8} (6,72^2 + 5,42^2) + (6,72 + 5,42) \frac{22,36}{2} = 164,98 \text{ мм}^2 \quad (4.12)$$

4.10 Определим плотность тока в стержне J_2 :

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{425}{164,98 \cdot 10^{-6}} = 2,58 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (4.13)$$

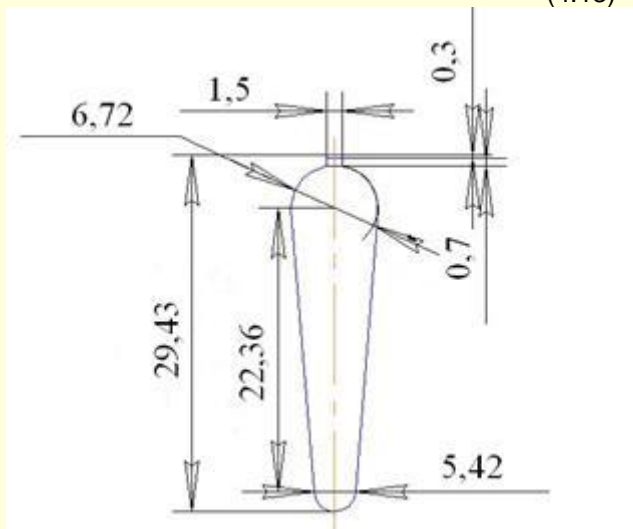


Рисунок 4.1. Паз спроектированного двигателя с короткозамкнутым ротором

4.11 Рассчитаем площадь сечения короткозамыкающих колец $q_{кл}$:

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} \quad , (4.14)$$

где $I_{кл}$ - ток в кольце, определим по формуле:

$$I_{кл} = I_2 / \Delta \quad , (4.15)$$

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha z}{2} = 2 \sin \frac{\pi p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{5 \cdot \pi}{108} = 0,2899$$

где
тогда

$$I_{\text{кл}} = \frac{425}{0,2899} = 1466,4$$

$$J_{\text{кл}} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 2,58 \cdot 10^6 = 2,193 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2, \quad (4.16)$$

$$q_{\text{кл}} = \frac{1466}{2,193 \cdot 10^6} = 668,49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

4.12 Рассчитаем рамеры замыкающих колец $a_{\text{кл}}$, $b_{\text{кл}}$ и средний диаметр кольца $D_{\text{к.ср}}$:

$$b_{\text{кл}} = 1,25 \cdot h_{\text{п2}} = 1,25 \cdot 29,43 = 36,79 \text{ мм}, \quad (4.17)$$

$$a_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{b_{\text{кл}}} = \frac{668,49}{36,79} = 18,17 \text{ мм} \quad (4.18)$$

Уточним площадь сечения кольца:

$$q_{\text{кл}} = a_{\text{кл}} \cdot b_{\text{кл}} = 18,17 \cdot 36,79 = 668,47 \text{ мм}^2, \quad (4.19)$$

$$D_{\text{к.ср}} = D_2 - b_{\text{кл}} = 446,6 - 36,79 = 409,81 \text{ мм} \quad (4.20)$$

5. Расчёт намагничивающего тока

5.1 Значение индукций в зубцах ротора и статора:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{\text{см1}} \cdot k_c} = \frac{0,859 \cdot 0,0156}{0,008 \cdot 0,97} = 1,73 \text{ Тл}, \quad (5.1)$$

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot l_{\text{см2}} \cdot k_c} = \frac{0,859 \cdot 0,01298}{0,00605 \cdot 0,97} = 1,9 \text{ Тл} \quad (5.2)$$

5.2 Рассчитаем индукцию в ярме статора B_a :

$$B_a = \frac{\Phi}{2 h_a l_{\text{СТ1}} k_c} = \frac{0,02332}{2 \cdot 0,0345 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 1,15 \text{ Тл} \quad (5.3)$$

5.3 Определим индукцию в ярме ротора B_j :

$$B_j = \frac{\Phi}{2 h'_j l_{\text{СТ2}} k_c}, \quad (5.4)$$

где h'_j — расчетная высота ярма ротора, м.

Для двигателей с $2p \geq 4$ с посадкой сердечника ротора на втулку или на оребренный вал h'_j определяют по формуле:

$$h'_j = \left(\frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} \right) = \left(\frac{446,6 - 135,7}{2} - 29,43 \right) = 126,02 \text{ мм}, \quad (5.5)$$

$$B_j = \frac{0,02332}{2 \cdot 0,12602 \cdot 0,303 \cdot 0,97} = 0,315 \text{ Тл}$$

5.4 Магнитное напряжение воздушного зазора F_d :

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \mathcal{K}_{\delta} = 1,59 B_{\delta} \mathcal{K}_{\delta} \cdot 10^6, \quad (5.6)$$

где K_d - коэффициент воздушного зазора, определим по формуле:

$$k_{\delta} = \left[\frac{t_1}{t_1 - \gamma \delta} \right], \quad (5.7)$$

$$\gamma = \frac{(b_{\text{ш1}} / \delta)^2}{5 + b_{\text{ш1}} / \delta} = \frac{(4 / 0,7)^2}{5 + 4 / 0,7} = 3,05$$

где

$$k_{\delta} = \left[\frac{15,6}{15,6 - 3,05 \cdot 0,7} \right] = 1,16$$

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,859 \cdot 0,7 \cdot 1,16 \cdot 10^{-3} = 1109,4$$

5.5 Магнитное напряжение зубцовых зон статора F_{z1} :

$$F_{z1} = 2h_{z1} H_{z1}, \quad (5.8)$$

где $2h_{z1}$ — расчетная высота зуба статора, м.

H_{z1} определим по [1] таблице П-1.7. При $B_{z1} = 1,73 \text{ Тл}$, $H_{z1} = 1250 \text{ А/м}$.

$$F_{z1} = 2 \cdot 0,0365 \cdot 1250 = 91,25 \text{ А}$$

5.6 Магнитное напряжение зубцовых зон ротора F_{z2} :

$$F_{z2} = 2h_{z2} H_{z2}, \quad (5.9)$$

где $h_{z2} = h_{\text{п2}} - 0,1b_2 = 29,43 - 0,1 \cdot 5,42 = 28,89 \text{ мм}$,

$H_{z2} = 2070 \text{ А/м}$, [1] таблица П-1.7.

$$F_{z2} = 2 \cdot 0,02889 \cdot 2070 = 119,6 \text{ А}$$

5.7 Рассчитаем коэффициент насыщения зубцовой зоны k_z :

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{91,25 + 119,6}{1109} = 1,2 \quad (5.10)$$

5.8 Найдём длину средней магнитной линии ярма статора L_a :

$$L_a = \frac{\pi(D_a - h_a)}{2p} = \frac{\pi(0,590 - 0,0345)}{10} = 0,1744 \text{ м} \quad (5.11)$$

5.9 Определим напряженность поля H_a при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма принятой марки стали 2013 [1] таблица П-1.6. При $B_a = 1,15 \text{ Тл}$, $H_a = 241 \text{ А/м}$.

5.10 Найдём магнитное напряжение ярма статора F_a :

$$F_a = L_a H_a = 0,1744 \cdot 241 = 42,03 \text{ А} \quad (5.12)$$

5.11 Определим длину средней магнитной линии потока в ярме ротора L_j :

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p}, \quad (5.13)$$

где h_j - высота спинки ротора, находится по формуле:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\text{п2}} = \frac{0,4466 - 0,1357}{2} - 0,02943 = 0,12602 \text{ м} \quad (5.14)$$

$$L_j = \frac{\pi(0,1357 + 0,12602)}{4} = 0,20545 \text{ м}$$

5.12 Напряжённость поля H_j при индукции $B_j = 0,315 \text{ Тл}$ определим по кривой намагничивания ярма для принятой марки стали [1] таблица П-1.6. При $B_j = 0,315 \text{ Тл}$, $H_j = 43 \text{ А/м}$.

Определим магнитное напряжение ярма ротора F_j :

$$F_j = L_j H_j = 0,20545 \cdot 43 = 8,83 \text{ А} \quad (5.15)$$

5.13 Рассчитаем суммарное магнитное напряжение магнитной цепи машины (на пару полюсов) F_{Σ} :

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 1109 + 91,25 + 119,6 + 42,03 + 8,83 = 1370,71 A \quad (5.16)$$

5.14 Коэффициент насыщения магнитной цепи k_{μ} :

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = \frac{1370,71}{1109} = 1,24 \quad (5.17)$$

5.15 Намагничивающий ток I_{μ} :

$$I_{\mu} = \frac{p F_{\Sigma}}{0,9 m_1 \omega_1 k_{\phi \delta l}} = \frac{5 \cdot 1370,71}{0,9 \cdot 3 \cdot 45 \cdot 0,91} = 61,99 A \quad (5.18)$$

Относительное значение намагничивающего тока I_{μ}^* :

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1\kappa}} = \frac{61,99}{216} = 0,287 \quad (5.19)$$

6. Параметры рабочего режима

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора x_1 , r_1 , ротора r_2 , x_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} (или x_m), и расчетное сопротивление r_{12} (или r_m), введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Схемы замещения фазы асинхронной машины, основанные на приведении процессов во вращающейся машине к неподвижной, приведены на рисунке 6.1. Физические процессы в асинхронной машине более наглядно отражает схема, изображенная на рисунке 6.1. Но для расчета удобнее преобразовать ее в схему, показанную на рисунке 6.2.

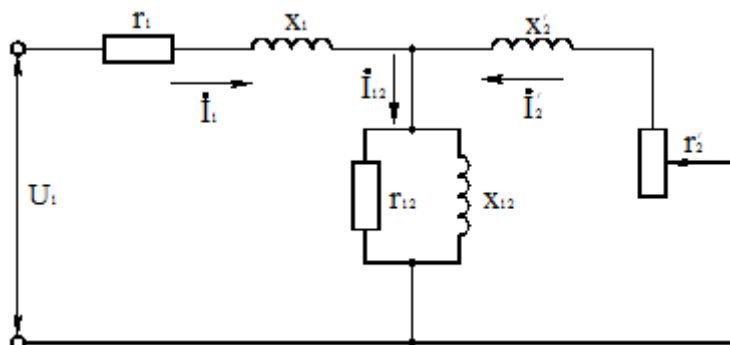


Рисунок 6.1. Схема замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины

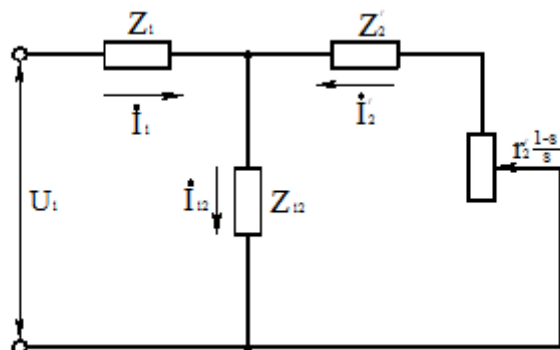


Рисунок 6.2. Преобразованная схема замещения фазы обмотки приведенной асинхронной машины

6.1 Активное сопротивление фазы обмотки статора r_1 рассчитаем по формуле:

$$r_1 = k_r \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\phi} a}, \quad (6.1)$$

где L_1 - общая длина эффективных проводников фазы обмотки, м;

a - число параллельных ветвей обмотки;

ρ_{115} - удельное сопротивление материала обмотки (меди для статора) при расчетной

температуре. Для меди $\rho_{115} = 10^{-8} / 41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;

k_r - коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока.

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому в расчетах нормальных машин, как правило, принимают $k_r=1$.

6.2 Общую длину проводников фазы обмотки L_1 рассчитаем по формуле:

$$L_1 = l_{cp} \cdot \omega_1, \quad (6.2)$$

где l_{cp} - средняя длина витка обмотки, м.

6.3 Среднюю длину витка l_{cp} находят как сумму прямолинейных - пазовых и изогнутых лобовых частей катушки:

$$l_{cp} = 2(l_{\Pi} + l_{\Delta}), \quad (6.3)$$

где l_{Π} - длина пазовой части, равна конструктивной длине сердечников машины. $l_{\Pi} = 0,303(\text{м})$;

l_{Δ} - длина лобовой части.

6.4 Длина лобовой части катушки насыпной обмотки статора определяется по формуле:

$$l_{\Delta} = K_{\Delta} b_{KT} + 2B, \quad (6.4)$$

где K_{Δ} - коэффициент, значение которого зависит от числа пар полюсов, для $2p=10$ [1] $K_{\Delta} = 1,5$;

b_{KT} - средняя ширина катушки, м, определяемая по дуге окружности, проходящей по серединам высоты пазов:

$$b_{KT} = \frac{\pi(D + h_{\Pi})}{2p} \beta_1, \quad (6.5)$$

где β_1 - относительное укорочение шага обмотки статора. Обычно принимают $\beta_1 = 1$.

$$b_{KT} = \frac{\pi(0,448 + 0,0365)}{10} \cdot 1 = 0,152 \text{ м}$$

Коэффициент $B = 0,01(\text{м})$ для насыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус.

$$l_{\Delta} = K_{\Delta} b_{KT} + 2B = 1,5 \cdot 0,152 + 2 \cdot 0,01 = 0,248 \text{ м}$$

Средняя длина:

$$l_{cp} = 2(0,303 + 0,248) = 1,102 \text{ м}$$

Общая длина эффективных проводников фазы обмотки:

$$L_1 = 1,102 \cdot 45 = 49,59 \text{ м}$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$r_1 = 1 \cdot \frac{10^{-8}}{41} \cdot \frac{49,59}{23,58 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,0256 \text{ Ом}$$

6.5 Определим длину вылета по лобовой части:

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} b_{KT} + 2B = 0,5 \cdot 0,152 + 2 \cdot 0,01 = 0,096 \text{ м}, \quad (6.6)$$

где $K_{\text{выл}}$ - коэффициент, определяемый по [1] таблице 9.23. $K_{\text{выл}} = 0,5$ при $2p=10$.

6.6 Определим относительное значение сопротивления фазы обмотки статора r_1^* :

$$r_1^* = r_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,0256 \cdot \frac{216}{220} = 0,025 \text{ Ом} \quad (6.7)$$

6.7 Определим активное сопротивление фазы обмотки ротора r_2 :

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2}, \quad (6.8)$$

где r_c - сопротивление стержня;

$r_{кл}$ - сопротивление кольца.

6.8 Сопротивление стержня рассчитаем по формуле:

$$r_c = \rho_c \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,303}{164,98 \cdot 10^{-6}} = 89,56 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (6.9)$$

6.9 Рассчитаем сопротивление кольца:

$$r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср.}}{Z_2 q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{\pi \cdot 0,40981}{108 \cdot 668,47 \cdot 10^{-6}} = 0,869 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (6.10)$$

Тогда активное сопротивление ротора:

$$r_2 = 89,56 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 0,869 \cdot 10^{-6}}{0,2899^2} = 110,24 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

6.10 Приведём r_2 к числу витков обмотки статора, определим r_2' :

$$r_2' = r_2 \frac{4m(\omega k_{ссл})^2}{Z_2} = 110,24 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (45 \cdot 0,91)^2}{108} = 0,0205 \text{ Ом} \quad (6.11)$$

6.11 Относительное значение сопротивления фазы обмотки ротора.

$$r_2^* = r_2' \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,0205 \cdot \frac{216}{220} = 0,0201 (\text{Ом}) \quad (6.12)$$

6.12 Индуктивное сопротивление фаз обмотки ротора:

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \left(\frac{\omega_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_s'}{pq} (\lambda_{н1} + \lambda_{л1} + \lambda_{\partial 1}) \quad (6.13)$$

где l_n – коэффициент магнитной проводимости пазового ротора.

Исходя из рисунка 9.50, в l_n определим по формуле из [1] таблицы 9.26:

$$\lambda_n = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) \cdot k'_\beta \quad (6.14)$$

где $k_\beta = 1$, $k'_\beta = 1$, $b_1 = 7,8 \text{ мм}$, $h_2 = h_{ПК} - 2b_{ш} = 32,8 \text{ мм}$, $h_1 = 0$

(проводники закреплены пазовой крышкой).

$$h_k = \frac{b_1 - b_{ш}}{2} = \frac{7,8 - 4}{2} = 1,9 \text{ мм} \quad (6.15)$$

$$\lambda_n = \frac{32,8}{3 \cdot 7,8} \cdot 1 + \left(0 + \frac{3 \cdot 1,9}{7,8 + 2 \cdot 4} + \frac{1}{4} \right) \cdot 1 = 2,01$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_s'} \cdot (l_{л1} - 0,64 \beta \tau) = 0,34 \cdot \frac{3}{0,303} \cdot (0,248 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,141) = 0,53 \quad (6.16)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния, определим по формуле:

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi \quad (6.17)$$

$$\xi = 2k'_{\text{ск}}k_{\beta} - k_{\beta 1}^2 \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 (1 + \beta_{\text{ск}}^2) = 2 \cdot 0,8 - 0,91^2 \cdot 0,83^2 \cdot 1 = 1,03$$

где

где $k'_{\text{ск}}$ определяется графически, при $\frac{t_2}{t_1} = 0,83$, $k'_{\text{ск}} = 0,8$ [1] рисунок 9.51, д, $\beta_{\text{ск}} = 0$.

$$\lambda_{\partial 1} = \frac{15,6}{12 \cdot 0,7 \cdot 1,16} \cdot 1,03 = 1,65$$

По формуле (6.13) рассчитаем индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{45}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,303}{5 \cdot 3} (2,01 + 0,53 + 1,65) = 0,135 \text{ Ом}$$

6.13 Определим относительное значение индуктивного сопротивления обмотки статора x_1^* :

$$x_1^* = x_1 \frac{I_{1\text{н}}}{U_{1\text{н}}} = 0,135 \cdot \frac{216}{220} = 0,133 \text{ Ом} \quad (6.18)$$

6.14 Произведём расчёт индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора по формуле:

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_{\delta} (\lambda_{n2} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\partial 2}) \cdot 10^{-6}, \quad (6.19)$$

где l_{n2} – коэффициент магнитной проводимости паза ротора;

$l_{\text{л}2}$ – коэффициент магнитной проводимости лобовой части ротора;

$l_{\partial 2}$ – коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора.

Коэффициент магнитной проводимости паза ротора рассчитаем по формуле, исходя из [1] таблица 9.27:

$$\lambda_{n2} = \left[\frac{h_0}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{\text{ш}}}{2b_1} \right] k_{\delta} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} + 1,12 \frac{h'_{\text{ш}}}{I_2} \cdot 10^6, \quad (6.20)$$

где $b_1 = 6,72 \text{ мм}$, $k_{\delta} = 1$.

$$h_0 = h_{n2} - h_{\text{ш}} h'_{\text{ш}} - 0,2 \cdot 1,8 = 29,43 - 0,7 \cdot 0,3 - 0,2 \cdot 1,8 = 28,86 \text{ мм}, \quad (6.21)$$

$$\lambda_{n2} = \left[\frac{28,86}{3 \cdot 6,72} \left(1 - \frac{\pi \cdot 6,72}{8 \cdot 164,98} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 6,72} \right] \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} + 1,12 \cdot \frac{0,3 \cdot 10^{-3}}{425} \cdot 10^6 = 3,2$$

6.15 Коэффициент магнитной проводимости лобовой части ротора определим по формуле:

$$\lambda_{\text{л}2} = \frac{2,3 D_{\text{кл.ср.}}}{Z_2 l'_{\delta} \Delta^2} \cdot \lg \left(\frac{4,7 D_{\text{кл.ср.}}}{2a_{\text{кл}} + b_{\text{кл}}} \right),$$

$$\lambda_{\text{л}2} = \frac{2,3 \cdot 409,81 \cdot 10^{-3}}{108 \cdot 0,303 \cdot 0,2899^2} \cdot \lg \left(\frac{4,7 \cdot 409,81 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 18,17 + 36,79} \right) = 0,5 \quad (6.22)$$

6.16 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора определим по формуле:

$$\lambda_{\partial 2} = \frac{t_2}{12 \delta k_{\delta}} \xi, \quad (6.23)$$

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta Z}{1 - (p/Z_2)^2} \approx 1$$

где

$$\lambda_{\partial 2} = \frac{12,98}{12 \cdot 0,7 \cdot 1,16} \cdot 1 = 1,33$$

6.17 Найдём значение индуктивного сопротивления по формуле (6.19):

$$x_2 = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,303 \cdot (3,2 + 0,5 + 1,33) \cdot 10^{-6} = 602 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Приведём x_2 к числу витков статора:

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(\omega_1 k_{\phi\delta})^2}{Z_2} = 602 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(45 \cdot 0,91)^2}{108} = 0,11 \text{ Ом} \quad (6.24)$$

Относительное значение, x'_2^* :

$$x'_2^* = x'_2 \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,11 \cdot \frac{216}{220} = 0,108 \text{ Ом} \quad (6.25)$$

7. Расчёт потерь

7.1 Рассчитаем основные потери в стали статора асинхронной машины по формуле:

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/5,0} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{\delta a} B_a^2 m_a + k_{\delta z} B_{z1}^2 m_{z1}) \quad (7.1)$$

где $p_{1,0/5,0}$ – удельные потери, $p_{1,0/5,0} = 2,5 \text{ Вт/кг}$ [1] таблица 9.28;

β – показатель степени, для марки стали 2013 $\beta = 1,5$;

$k_{\delta a}$ и $k_{\delta z}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали, для стали марки 2013 $k_{\delta a} = 1,6$, $k_{\delta z} = 1,8$;

m_a – масса ярма, считается по формуле:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{cm1} k_c \gamma_c, \\ m_a = \pi(0,59 - 0,0345) \cdot 0,0345 \cdot 0,303 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 137,96 \text{ кг} \quad (7.2)$$

где $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ – удельная масса стали.

Масса зубцов статора:

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1cp} Z_1 l_{cm1} k_c \gamma_c = 36,5 \cdot 10^{-3} \cdot 8 \cdot 10^{-3} \cdot 90 \cdot 0,303 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 60,25 \text{ кг} \quad (7.3)$$

$$P_{ст.осн} = 2,5 \cdot (1,6 \cdot 1,15^2 \cdot 137,96 + 1,8 \cdot 1,7^2 \cdot 60,25) = 1513,35 \text{ Вт}$$

7.2 Рассчитаем полные поверхностные потери в роторе:

$$P_{пов2} = p_{пов2} (t_2 - b_{w2}) Z_2 l_{cm2} \quad (7.4)$$

где $p_{пов2}$ – удельные поверхностные потери, определим по формуле:

$$p_{пов2} = 0,5 \cdot k_{02} \left(\frac{Z_1 n_1}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_1 \cdot 10^3)^2 \quad (7.5)$$

где $k_{02} = 1,5$ – коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери;

B_{02} – амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре, определим по формуле:

$$B_{02} = \beta_{02} k_\delta B_\delta = 0,33 \cdot 1,16 \cdot 0,859 = 0,329 \quad (7.6)$$

где $\beta_{02} = 0,33$ определяется графически при $\frac{b_{w1}}{\delta} = 5,71$ [1] рисунок 9.53, б.

7.3 Рассчитаем удельные поверхностные потери по формуле (7.5):

$$p_{пов2} = 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{90 \cdot 600}{10000} \right)^{1,5} (0,329 \cdot 0,0156 \cdot 10^3)^2 = 247,74 \text{ Вт/м}^2$$

$$P_{пов2} = 247,74 \cdot (12,98 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 108 \cdot 0,303 = 93,07 \text{ Вт}$$

7.4 Рассчитаем пульсационные потери в зубцах ротора:

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пул2}} \right)^2 m_{z2}, \quad (7.7)$$

где m_{z2} – масса стали зубцов ротора;
 $B_{\text{пул2}}$ – амплитуда магнитной пульсации в роторе.

$$m_{z2} = h_{z2} b_{z2cp} Z_2 l_{cm2} k_c \gamma_c = 0,02889 \cdot 0,00605 \cdot 108 \cdot 0,303 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 43,27 \text{ кг}, \quad (7.8)$$

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \delta}{2 t_2} B_{z2cp} = \frac{3,05 \cdot 0,7}{2 \cdot 12,98} \cdot 1,9 = 0,156 \text{ Тл}, \quad (7.9)$$

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \left(\frac{90 \cdot 600}{1000} \cdot 0,156 \right)^2 \cdot 43,27 = 337,75 \text{ Вт}$$

7.5 Определим сумму добавочных потерь в стали:

$$P_{\text{ст.доб.}} = P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} = 93,07 + 337,75 = 430,82 \text{ Вт} \quad (7.10)$$

7.6 Полные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{осн.ст.}} + P_{\text{ст.доб.}} = 1513,35 + 430,82 = 1944,17 \text{ Вт} \quad (7.11)$$

7.7 Определим механические потери:

$$P_{\text{мех.}} = K_T (10 D_a)^3 = 0,2 \cdot (10 \cdot 0,59)^3 = 41,08 \text{ Вт}, \quad (7.12)$$

где $K_T = 0,2$, при $2p = 10$ по таблице 9.29 [1].

7.8 Рассчитаем добавочные потери при номинальном режиме:

$$P_{\text{доб.н.}} = 0,005 \frac{P_{2н}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{110000}{0,93} = 591,4 \text{ Вт} \quad (7.13)$$

7.9 Ток холостого хода двигателя:

$$I_{\text{х.х.}} = \sqrt{I_{\text{х.х.а.}}^2 + I_{\mu}^2}, \quad (7.14)$$

где $I_{\text{х.х.а.}}$ – активная составляющая тока холостого хода, её определим по формуле:

$$I_{\text{х.х.а.}} = \frac{P_{\text{ст.}} + P_{\text{мех.}} + P_{\text{эл.х.х.}}}{m U_{\text{лн}}} = \frac{1944,17 + 41,08 + 295,12}{3 \cdot 220} = 3,46 \text{ А}, \quad (7.15)$$

где $P_{\text{эл.х.х.}}$ – электрические потери в статоре при холостом ходе:

$$P_{\text{эл.х.х.}} = m I_{\mu}^2 r_1 = 3 \cdot 61,99^2 \cdot 0,0256 = 295,12 \text{ Вт}, \quad (7.16)$$

$$I_{\text{х.х.}} = \sqrt{3,46^2 + 61,99^2} = 62,09 \text{ А}$$

7.10 Определим коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos \varphi_{\text{х.х.}} = \frac{I_{\text{х.х.а.}}}{I_{\text{х.х.}}} = \frac{3,46}{62,09} = 0,06 \quad (7.17)$$

8. Расчёт рабочих характеристик

8.1 Определим действительную часть сопротивления:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн.}}}{m I_{\mu}^2} = \frac{1513,35}{3 \cdot 61,99^2} = 0,13 \text{ Ом} \quad (8.1)$$

8.2 Мнимая часть сопротивления:

$$x_{12} = \frac{U_{\text{лн}}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{61,99} - 0,135 = 3,41 \text{ Ом} \quad (8.2)$$

8.3 Постоянная электродвигателя:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,135}{3,41} = 1,039 \quad (8.3)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \gamma &= \left(\frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} \right) = \\ &= \left(\frac{0,0256 \cdot 3,41 - 0,13 \cdot 0,135}{0,13(0,0256 + 0,13) + 3,41(0,135 + 3,41)} \right) = 0,0058 \end{aligned} \quad (8.4)$$

8.4 Определим активную составляющую тока:

$$I_{oa} = \frac{P_{см.осн} + 3I_{\mu}^2 r_1}{3U_{1н}} = \frac{1513,35 + 3 \cdot 61,99^2 \cdot 0,0256}{3 \cdot 220} = 2,744 \quad (8.5)$$

8.5 Определим величины:

$$\begin{aligned} b' &= 0, \\ a'_1 &= c_1^2 = 1,039^2 = 1,0795 \end{aligned} \quad (8.6)$$

$$a = c_1 r_1 = 1,039 \cdot 0,0256 = 0,0266 \quad (8.7)$$

$$b = c_1(x_1 + c_1 x'_1) = 1,039(0,135 + 1,039 \cdot 0,11) = 0,26 \quad (8.8)$$

8.6 Потери, не меняющиеся при изменении скольжения:

$$P_{см.} + P_{мех.} = 1944,17 + 41,08 = 1985,25 \text{ Вт} \quad (8.9)$$

Принимаем $s_n \approx r_2^* \approx 0,0201$ и рассчитаем рабочие характеристики, при скольжении равном: 0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,0201. Результаты расчёта запишем в таблицу 8.1.

$P_{2н} = 110 \text{ кВт}$; $U_{1н} = 220/380 \text{ В}$; $2p = 10$ $I_{0a} = 2,74 \text{ А}$; $I_{0p} = I_m = 61,99 \text{ А}$;

$P_{с.т} + P_{мех.} = 1985,25 \text{ Вт}$; $r_1 = 0,0256 \text{ Ом}$; $r\phi_2 = 0,0205 \text{ Ом}$; $c_1 = 1,039$;

$a\phi = 1,0795$; $a = 0,0266 \text{ Ом}$; $b\phi = 0$; $b = 0,26 \text{ Ом}$

Таблица 8.1

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Расчётная формула	С. И.	Скольжение s				
		0,005	0,01	0,015	0,02	0,0201
$a' \cdot r'_1 / s$	Ом	4,43	2,21	1,48	1,11	1,1
$b' \cdot r'_1 / s$	Ом	0	0	0	0	0
$R = a + a' \cdot r'_1 / s$	Ом	4,46	2,24	1,51	1,11	1,1
$X = b + b' \cdot r'_1 / s$	Ом	0,26	0,2	0,2	0,2	0,2
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	4,47	2,26	1,53	1,11	1,1
$I_2'' = U_{1н} / Z$	А	49,22	97,35	14,79	18,03	18,66
$\cos \phi_2' = R / Z$	-	0,998	0,991	0,987	0,974	0,974
$\sin \phi_2' = X / Z$	-	0,058	0,115	0,169	0,222	0,224
$I_{1a} = I_{oa} + I_2'' \cos \phi_2'$	А	51,86	99,21	14,66	18,58	18,74
$I_{1p} = I_{op} + I_2'' \sin \phi_2'$	А	64,84	73,19	86,29	10,37	10,47
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	83,03	123,29	16,44	21,86	21,61
$I_2' = c_1 I_2''$	А	51,14	101,15	14,94	19,53	19,06
$P_1 = 3U_{1н} I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	34,23	65,48	95,48	12,26	12,37

$P_{s1} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,529	1,167	2,179	3,479	3,537
$P_{s2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,161	0,29	1,372	2,347	2,388
$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$	кВт	0,171	0,27	0,477	0,613	0,619
$\sum P = P_{\text{св}} + P_{\text{доб}} + P_{\text{л}} + P_{\text{с}}$	кВт	2,846	4,106	6,011	8,421	8,527
$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	3,138	61,37	89,47	114,26	115,2
$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0,917	0,937	0,937	0,931	0,931
$\cos \varphi = I_{\text{ла}} / I_1$	-	0,625	0,805	0,859	0,873	0,874

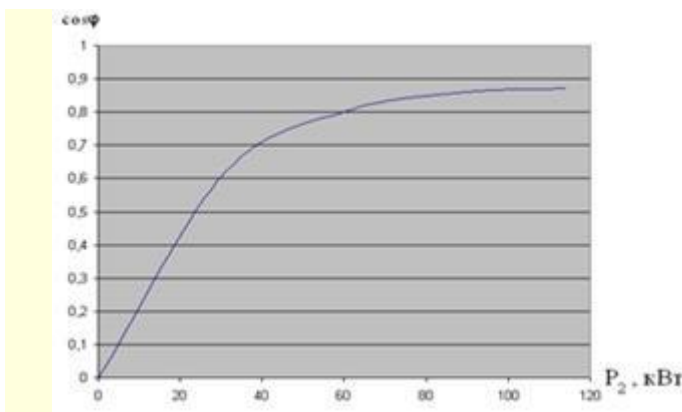


Рисунок 8.1. График зависимости $\cos \varphi$ двигателя от мощности P_2

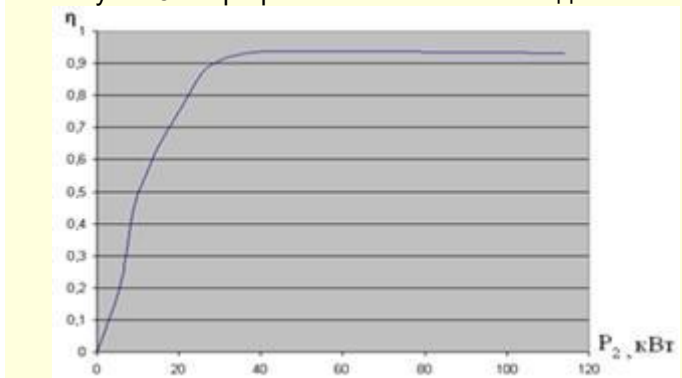


Рисунок 8.2. График зависимости КПД двигателя от мощности P_2

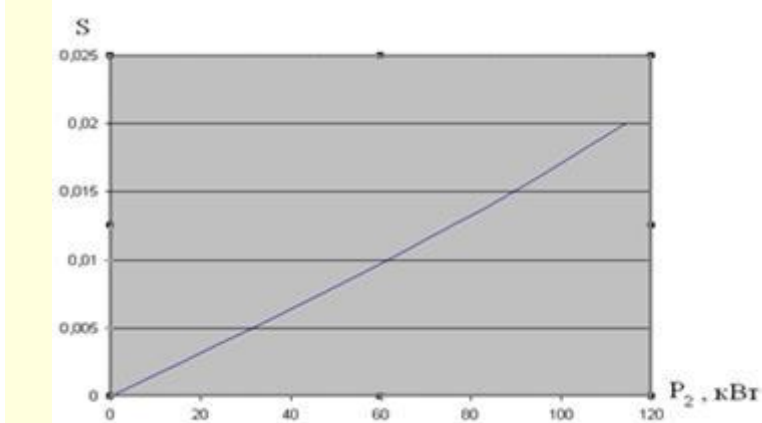


Рисунок 8.3. График зависимости скольжения s двигателя от мощности P_2

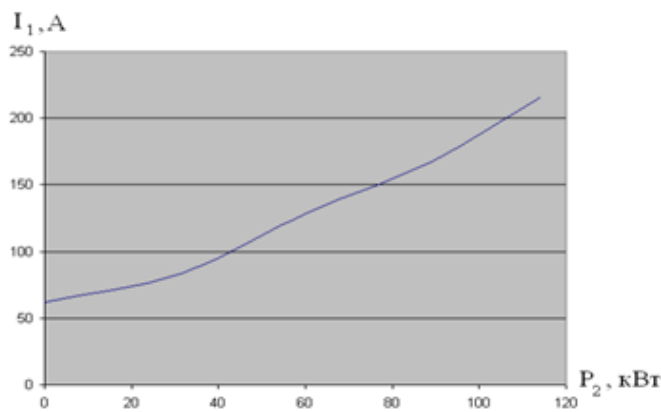


Рисунок 8.4. График зависимости тока статора I_1 двигателя от мощности P_2

9. Тепловой расчёт

9.1 Определим превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta v_{\text{ноел}} = K \cdot \frac{P'_{\text{э.н.1}} + P_{\text{ст.оч.}}}{\pi D l_1 \alpha_1}, \quad (9.1)$$

где $K = 0,74$ при $2p = 10$ и степени защиты IP23, [1] таблица.9.35;

α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности, определим графически [1] рисунок 9.68, б, $\alpha_1 \approx 81 \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{C}^\circ$.

$$P'_{\text{э.н.1}} = k_p P_{\text{с1}} \frac{2l_1}{l_{\text{сп.1}}}, \quad (9.2)$$

где k_p – коэффициент увеличения потерь, для класса нагревостойкости F $k_p = 1,07$.

$$P_{\text{с1}} = m I_1^2 r_1 = 3537 \text{ Вт}, \quad (9.3)$$

$$P'_{\text{э.н.1}} = 1,07 \cdot 3537 \cdot \frac{2 \cdot 0,303}{1,102} = 2081,2 \text{ Вт}$$

$$\Delta v_{\text{ноел}} = 0,74 \cdot \frac{2081,2 + 1513,35}{\pi \cdot 0,448 \cdot 0,303 \cdot 81} = 77^\circ \text{C}$$

9.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta v_{\text{из.н1}} = \frac{P'_{\text{э.н.1}}}{Z_1 \Pi_{\text{н1}} l_1} \left(\frac{b_{\text{из.н1}}}{\lambda'_{\text{ске}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{\text{ске}}} \right), \quad (9.4)$$

где $\Pi_{\text{н1}}$ – периметр поперечного сечения паза статора, определим по формуле:

$$\Pi_{\text{н1}} = 2h_n + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0,0336 + 0,0078 + 0,0102 = 0,0852 \text{ м}; \quad (9.5)$$

$\lambda'_{\text{ске}}$ – средняя эквивалентная теплопроводимость пазовой части, для класса нагревостойкости F $\lambda'_{\text{ске}} = 0,16 \text{ Вт} / \text{м} \cdot ^\circ \text{C}$, [1] страница 452;

$\lambda'_{\text{ске}}$ – среднее значение коэффициента теплопроводимости внутренней изоляции. $\lambda'_{\text{ске}}$

определим графически при $\frac{d}{d_{\text{из}}} = \frac{2,36}{2,46} = 0,96$, $\lambda'_{\text{ске}} = 1,5 \text{ Вт} / \text{м} \cdot ^\circ \text{C}$, [1] рисунок 9.69.

$$\Delta v_{\text{из.н1}} = \frac{2081,2}{90 \cdot 0,0852 \cdot 0,303} \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{0,0078 + 0,0102}{16 \cdot 1,5} \right) = 2,91^\circ \text{C}$$

9.3 Определим перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta V_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{э.л1}}}{2Z_1 \Pi_{\text{л1}} l_1} \left(\frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{вкс}}} + \frac{h_{\text{л1}}}{12 \lambda'_{\text{вкс}}} \right), \quad (9.6)$$

$$P'_{\text{э.л1}} = k_p P_{\text{э1}} \frac{2l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}}} = 1,07 \cdot 3537 \cdot \frac{2 \cdot 0,248}{1,102} = 1703,4 \text{ Вт}, \quad \Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{л1}} = 0,0852 \text{ м}$$

где Лобовые части обмотки статора не изолированы, поэтому $b_{\text{из.л1}} = 0$.

$$\Delta V_{\text{из.л1}} = \frac{1703,4}{2 \cdot 90 \cdot 0,0852 \cdot 0,303} \left(\frac{0}{0,16} + \frac{0,0336}{12 \cdot 1,5} \right) = 0,68^\circ \text{C}$$

9.4 Рассчитаем превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta V_{\text{нос.л1}} = \frac{KP'_{\text{э.л1}}}{2\pi D l_{\text{выл1}} \alpha_1} = \frac{0,74 \cdot 1703,4}{2 \cdot \pi \cdot 0,448 \cdot 0,096 \cdot 81} = 57,6^\circ \text{C} \quad (9.7)$$

9.5 Определим среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta V'_1 = \frac{(\Delta V_{\text{нос.л1}} + \Delta V_{\text{из.л1}}) \cdot 2l_1}{l_{\text{сп1}}} + \frac{(\Delta V_{\text{из.л1}} + \Delta V_{\text{нос.л1}}) \cdot 2l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}}} =$$

$$= \frac{(77 + 2,91) \cdot 2 \cdot 0,303}{1,102} + \frac{(0,68 + 57,6) \cdot 2 \cdot 0,248}{1,102} = 70,17^\circ \text{C} \quad (9.8)$$

9.6 Рассчитаем среднее превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды:

$$\Delta V_{\text{э}} = \frac{\sum P'_{\text{э}}}{S_{\text{кор.}} \alpha_{\text{э}}}, \quad (9.9)$$

где $\alpha_{\text{э}}$ – определим графически [1] рисунок 9.68, $\alpha_{\text{э}} = 800 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}$;

$\sum P'_{\text{э}}$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя:

$$\sum P'_{\text{э}} = \sum P' - (1 - K)(P'_{\text{э.л1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9 P_{\text{мех}}, \quad (9.10)$$

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) = 8527 + (1,07 - 1)(3537 + 2388) = 8942 \text{ Вт}, \quad (9.11)$$

где $\sum P$ – суммарные потери в двигателе при номинальном режиме;

$P_{\text{э1}}$ – электрические потери в обмотке статора при номинальном режиме;

$P_{\text{э2}}$ – электрические потери в обмотке ротора при номинальном режиме.

$$\sum P'_{\text{э}} = 8942 - (1 - 0,74)(2081,2 + 1513,35) - 0,9 \cdot 41,08 = 7970,45 \text{ Вт},$$

$$S_{\text{кор.}} = (\pi D_a + 8 \Pi_p)(l_1 + 2l_{\text{выл1}}) =$$

$$= (\pi \cdot 0,59 + 8 \cdot 0,5)(0,303 + 2 \cdot 0,096) = 2,9 \text{ м}^2, \quad (9.12)$$

где $S_{\text{кор.}}$ – площадь поверхности станины.

Π_p определяем графически. При $h = 315 \text{ мм}$, $\Pi_p = 0,5$ рисунок 9.70 [1].

$$\Delta V'_{\text{э}} = \frac{7970,45}{2,9 \cdot 800} = 3,43^\circ \text{C}$$

9.7 Определим среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta V_1 = \Delta V'_1 + \Delta V'_{\text{э}} = 70,17^\circ \text{C} + 3,43^\circ \text{C} = 73,6^\circ \text{C} \quad (9.13)$$

9.8 Определим расход воздуха, требуемый для вентиляции:

$$Q_{\text{э}} = \frac{\sum P'_{\text{э}}}{1100 \cdot 2 \Delta V'_{\text{э}}} = \frac{7970,45}{1100 \cdot 2 \cdot 3,43} = 1,05 \text{ м}^3 / \text{с} \quad (9.14)$$

9.9 Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором при конструктивном исполнении, и размерах принятых в серии 4А может быть приближённо определён по формуле:

$$Q'_s = m'(n_k b_k + 0,1) \frac{n}{100} D_a^2, \quad (9.15)$$

где n_k и b_k - число и ширина, м, радиальных вентиляционных каналов, страница 384 [1];
 n - частота вращения двигателя, об/мин;

m' - коэффициент, $m' = 3,15$ для двигателей с $2p \geq 4$.

$$Q'_s = 3,15 \cdot (9 \cdot 0,015 + 0,1) \cdot \frac{600}{100} \cdot 0,59^2 = 1,55 \text{ м}^3/\text{с}$$

$Q'_s > Q_s$, т.е. расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором больше расхода воздуха требуемого для вентиляции электродвигателя.

10. Расчёт рабочих характеристик по круговой диаграмме

10.1 Сначала определим ток синхронного холостого хода по формуле:

$$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{op}^2} = \sqrt{2,74^2 + 61,99^2} = 62,05 \text{ А}, \quad (10.1)$$

где $I_{op} \approx I_\mu$.

10.2 Рассчитаем активное и индуктивное сопротивления короткого замыкания:

$$x_{\kappa 1} = x_1 + C_1 \cdot x'_2 = 0,135 + 1,039 \cdot 0,11 = 0,250 \text{ Ом}, \quad (10.2)$$

$$r_{\kappa 1} = r_1 + C_1 \cdot r'_2 = 0,0256 + 1,039 \cdot 0,0205 = 0,0470 \text{ Ом} \quad (10.3)$$

10.3 Рассчитаем масштабы круговой диаграммы:

Масштаб тока равен:

$$m_I = \frac{U_{1\kappa}}{C_1 \cdot x_{\kappa 1} \cdot D_\kappa} = \frac{220}{1,039 \cdot 0,25 \cdot 200} = 4,23 \text{ А/мм}, \quad (10.4)$$

где D_κ - диаметр круга диаграммы, выбирается из интервала: $D_\kappa = [200 \div 250] \text{ мм}$,
 выберем $D_\kappa = 200 \text{ мм}$.

Масштаб мощности:

$$m_P = 3U_{1\kappa} m_I = 3 \cdot 220 \cdot 4,23 = 2792 \text{ Вт/мм} \quad (10.5)$$

Масштаб момента:

$$m_M = \frac{m_P}{\Omega} = \frac{2792}{62,8} = 44,5 \text{ Н} \cdot \text{м/мм} \quad (10.6)$$

Круговая диаграмма двигателя приведена ниже. Окружность диаметром D_κ с центром O_ϕ является геометрическим местом концов вектора тока статора двигателя при различных скольжениях. Точка A_0 определяет положение конца вектора тока I_0 при синхронном холостом ходе, а A'_0 - при реальном холостом ходе двигателя. Отрезок $|OA'_0| = I_{xx}$, $\cos \angle A'_0 OB_1$ равен коэффициенту мощности при холостом ходе. Точка A_3 определяет положение конца вектора тока статора при коротком замыкании ($s=1$), отрезок $|OA_3|$ - ток $I_{\kappa.з.}$, а угол $\angle A_3 OB_1$ - $\cos \varphi_{\kappa.з.}$. Точка A_2 определяет положение конца вектора тока статора при $S = \infty$.

Промежуточные точки на дуге $A_0 A_3$ определяют положение концов вектора тока I_1 при различных нагрузках в двигательном режиме ($0 < s \leq 1$). Ось абсцисс диаграммы OB является линией первичной мощности P_1 . Линией электромагнитной мощности $P_{эм}$ или электромагнитных моментов $M_{эм}$ является линия $A_0 A_2$. Линией полезной мощности на валу (вторичной мощности P_2) является линия $A_0 A_3$.

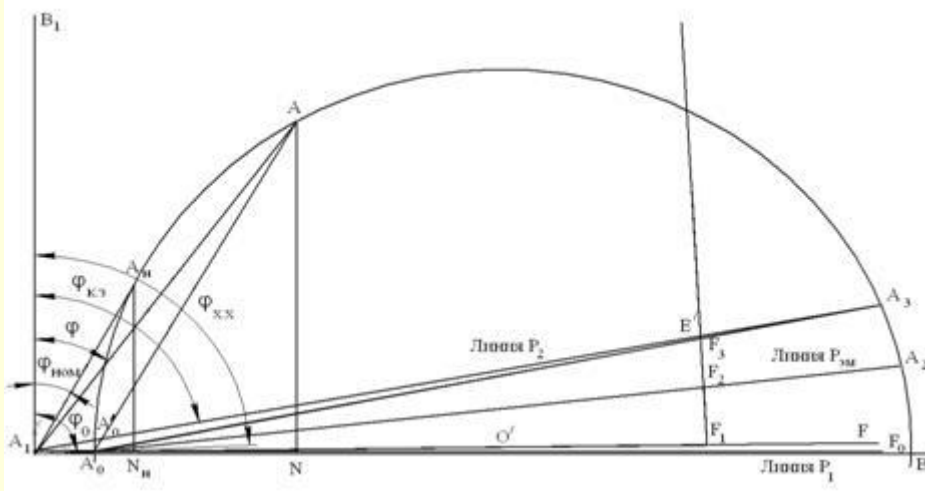


Рисунок 10.1. Круговая диаграмма

Заключение

В данном курсовом проекте был спроектирован асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. В результате расчета были получены основные показатели для двигателя заданной мощности z и $\cos \varphi$, которые удовлетворяют предельно допустимым значением ГОСТа для серии двигателей 4А. Был произведен расчет и построение рабочих характеристик проектируемой машины.

Таким образом, по данным расчета данному двигателю можно дать следующее условное обозначение:

4А315М10У3,

где:

4 – порядковый номер серии;

А – род двигателя – асинхронный;

315 – высота оси вращения;

М – условная длина станины по МЭК;

10 – число полюсов;

У – климатическое исполнение для умеренного климата;

3 – категория размещения.

Номинальные данные спроектированного двигателя:

$P_{2H} = 110$ кВт, $U_{1H} = 220/380$ В, $I_{1H} = 216$ А, $\cos \varphi_H = 0,83$, $\eta_H = 0,93$.

Список литературы

1. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / П79

И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.: ил.

2. Вольдек А.И., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: Учебник для вузов. – СПб.: – Питер, 2007. – 350 с.

3. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам: Учебное пособие для студентов образоват. учреждений сред. проф. образования/ Марк Михайлович Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 480 с.

