

Липецкий государственный технический университет

Факультет автоматизации и информатики

Кафедра электропривода

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по электрическим машинам

«Проектирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»

Вариант 31

Студент

Кондратьев С.Е.

Группа АСМР-19-1

Руководитель

Шишлин Д.И.

к.т.н, доцент

Липецк 2021 г.

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

По дисциплине ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

(наименование учебной дисциплины согласно учебному плану)

Студент группы: АСМР-19-1

Кондратьев С.Е.

Тема: Проектирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

2. Исходные данные к проекту: Вариант 31;

Номинальная мощность $P = 55$ кВт;

Число фаз – 3;

Номинальное напряжение $U_N = 380$ В ($U_{\Phi} = 220$ В);

Частота питающего напряжения – 50 Гц;

Синхронная скорость 3000 об/мин;

Способ охлаждения – самовентиляция IC0 141;

Режим работы – длительный.

Базовая модель двигатель серии 4A225M2, конструктивное исполнение IM1001, исполнение по защите IP44, класс нагревостойкости изоляции F.

3. Содержание пояснительной записки:

Определение главных размеров; расчет обмотки, электромагнитных нагрузок, числа пазов статора; определение размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора; расчет обмотки, пазов и ярма ротора; расчет намагничивающего тока; расчет параметров рабочего режима двигателя; расчет потерь в стали и механических потерь; расчет рабочих и пусковых характеристик; тепловой расчет двигателя – определение превышений температур.

Перечень графического материала: чертеж общего вида асинхронного двигателя

4. Срок сдачи законченного проекта 28 декабря 2021 г.

Руководитель проекта: к.т.н, доцент _____ / Шишлин Д.И./

Дата выдачи задания: 7 сентября 2021 г.

Аннотация

С.49. Ил.6. Табл.2. Литература 3 назв.

Основной задачей проектирования асинхронного двигателя, как и любой электрической машины, является выбор оптимальных параметров (главные размеры, расчет потерь, тепловой и вентиляционный расчеты и др.) проектируемой машины. Ниже представлен расчет параметров асинхронного двигателя. Также собраны в таблицу данные расчета рабочих характеристик асинхронного двигателя и данные расчета пусковых характеристик.

Оглавление

Введение.....	5
1 Выбор главных размеров.....	6
2 Определение Z_1 , w_1 и сечения провода обмотки статора	8
3 Расчёт размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора	11
4 Расчёт ротора	13
5 Расчёт намагничивающего тока	16
6 Параметры рабочего режима	20
7 Расчёт потерь	26
8 Расчёт рабочих и пусковых характеристик.....	30
9 Тепловой расчет и расчет вентиляции	45
Заключение	49
Список используемой литературы	50

Введение

Асинхронный двигатель является преобразователем электрической энергии в механическую и составляет основу большинства механизмов использующихся во всех отраслях народного хозяйства.

В настоящее время асинхронные двигатели потребляют более 70% вырабатываемой электрической энергии, на их изготовление расходуется большое количество дефицитных материалов: обмоточные меди, изоляции, электрической стали и других затрат.

На ремонт и обслуживание асинхронных двигателей в эксплуатации средства составляют более 5% затрат из обслуживания всего установленного оборудования.

Поэтому создание высокоэкономичных и надежных асинхронных двигателей является важнейшей задачей, Серия 4А подходит в качестве прототипа при проектировании.

1 Выбор главных размеров

Число пар полюсов

$$p = \frac{60 \cdot f}{n_1} = \frac{60 \cdot 50}{3000} = 1,$$

где n_1 – синхронная частота вращения, об/мин; f – частота питания, Гц.

Высота оси вращения $h = 225$ мм. Диаметр $D_a = 0,392$ м. Внутренний диаметр статора. $K_D = 0.52$

$$D = K_D \cdot D_a = 0,52 \cdot 0,392 = 0,204, \text{ м.}$$

(Базовый двигатель 4А80В2 с однослойной обмоткой).

Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot D}{2} = 0,32, \text{ м.}$$

Расчётная мощность

$$P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 65810, \text{ Вт,}$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, Вт; k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению. $k_E = 0,98$; $\eta = 0,90$ и $\cos \varphi = 0,91$. Электромагнитные нагрузки $A = 40000$ А/м, $B_\delta = 0,74$ Тл. Обмоточный коэффициент для однослойной обмотки $k_{o61} = 0,95$.

Расчётная длина магнитопровода (зазора):

$$l_{\delta} = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{o\delta 1} \cdot A \cdot B_{\delta}} = \frac{65810}{1.11 \cdot 0,204^2 \cdot 314,159 \cdot 0,95 \cdot 40000 \cdot 0,74} = 0,161, \text{ м.}$$

Синхронная угловая частота двигателя определяется по формуле:

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{1} = 314,159, \text{ рад/с.}$$

Отношение

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau} = \frac{0,161}{0,32} = 0,504.$$

Значение λ находится в допустимых пределах и изменение h не требуется.

2 Определение Z_1 , w_1 и сечения провода обмотки статора

Предельные значения $t_{1\max} = 18$ мм; $t_{1\min} = 16$ мм. Число пазов статора

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} = \frac{\pi \cdot 0,204}{0,018} = 35,577;$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} = \frac{\pi \cdot 0,204}{0,016} = 40,024.$$

Принимаем $Z_1=36$, тогда

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 6.$$

Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,204}{2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3} = 0,018, \text{ м.}$$

Число (целое) эффективных проводников в пазу (предварительно при условии $a = 1$) (нет параллельных ветвей).

$$I_{1н} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1н} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,91 \cdot 0,90} = 101,75, \text{ А.}$$

$$u'_{\Pi} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1н} \cdot Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,204 \cdot 40000}{36} = 6,993.$$

Принимаем $a = 2$.

$$u_n = a \cdot u' = 14.$$

Окончательные значения числа витков фазы, линейной нагрузки и магнитного потока.

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 42;$$

$$A = \frac{2 \cdot I_{1n} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = 4,004 \cdot 10^4, \text{ А/м};$$

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1n}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{o\sigma 1} \cdot f_1} = 0,024, \text{ Вб}.$$

Индукция в воздушном зазоре

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = 0,739, \text{ Тл}.$$

A и B_δ находятся в допустимых пределах.

Плотность тока в обмотке статора (предварительно) $AJ_1 = 185 \cdot 10^9$

$$J_1 = \frac{AJ_1}{A} = 4,625 \cdot 10^6, \text{ А/м}^2.$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно)

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1n}}{a \cdot J_1} = 11, \text{ мм}^2.$$

Принимаем $n_{\text{эл}} = 10$

$$q_{эл} = \frac{q_{эф}}{n_{эл}} = 1,1, \text{ мм}^2.$$

Обмоточный провод ПЭТВ: $d_{эл} = 1,18 \text{ мм}$; $d_{из} = 1,26 \text{ мм}$; $q_{эл} = 1,094 \text{ мм}^2$.

$$q_{эф} = q_{эл} \cdot n_{эл} = 10,94, \text{ мм}^2.$$

Плотность тока статора (окончательно)

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} = 4,65 \cdot 10^6, \text{ А/мм}^2.$$

3 Расчёт размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Паз статора определяем с соотношением размеров, обеспечивающим параллельность боковых граней зубцов. $B_{z1}=1,6$ Тл, $B_a=1,4$ Тл, $k_c=0,97$.

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,704 \cdot 0,014 \cdot 0,087}{1,6 \cdot 0,087 \cdot 0,97} = 8, \text{ мм};$$

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,005}{2 \cdot 1,4 \cdot 0,087 \cdot 0,97} = 55, \text{ мм}.$$

Размеры паза в штампе принимаем $b_{ш} = 4$ мм; $h_{ш} = 1$ мм, где $h_{ш}$ высота шлица паза; $b_{ш}$ ширина шлица паза.

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0,149 - 0,077}{2} - 20 = 39, \text{ мм};$$

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_n)}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (77 + 2 \cdot 15,7)}{18} - 6 = 16, \text{ мм};$$

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_n - b_{ш}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (77 + 2 \cdot 15,7 - 1,5) - 18 \cdot 6}{18 - \pi} = 10, \text{ мм};$$

$$h_1 = h_{II.K} = h_n - \left(h_u + \frac{b_2 - b_u}{2} \right) = 16 - \left(0,5 + \frac{8,8 - 1,5}{2} \right) = 35, \text{ мм}.$$

Размеры паза свету с учётом припуска на сборку

$$b_1' = b_1 - \Delta b_{II} = 16 - 0,2 = 15,8, \text{ мм};$$

$$b_2' = b_2 - \Delta h_{II} = 10 - 0,2 = 9,8, \text{ мм};$$

$$h_1' = h_1 - \Delta h_{II} = 35 - 0,2 = 34,8, \text{ мм},$$

где b_{II}' и h_{II}' – размеры паза “в свету”, полученные при расчете заполнения паза проводниками обмотки и изоляцией.

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников

$$S_n' = \frac{b_1' + b_2'}{2} h_1' - S_{из} - S_{np} = \frac{12,6 + 8,6}{2} \cdot 11,3 - 21,2 - 0 = 399,8, \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения прокладок и корпусной изоляции в пазу

$$S_{np} = 0,$$

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot h_n + b_1 + b_2) = 0,35 \cdot (2 \cdot 15,7 + 12,8 + 8,8) = 41,298, \text{ мм}^2.$$

Односторонняя толщина изоляции в пазу $b_{из} = 0,35$ мм. Коэффициент заполнения паза

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot u_n \cdot n_{эл}}{S_n'} = \frac{(0,49 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 144 \cdot 2}{99,1} = 0,556.$$

k_3 находится в допустимых пределах. Уточнение размеров паза не требуется.

4 Расчёт ротора

Воздушный зазор $\delta=1,2$ мм. Число пазов ротора $Z_2 = 28$. Внешний диаметр

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,201, \text{ м.}$$

Длина магнитопровода ротора $L_2 = L_1 = 0,161$ м. Зубцовое деление

$$t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,077}{15} = 23, \text{ мм.}$$

Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал ($k_B = 0,23$)

$$D_j = D_B = k_B \cdot D_A = 0,23 \cdot 0,392 = 0,09, \text{ мм.}$$

Ток в стержне ротора

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_1 = 0,928 \cdot 4,07 \cdot 82,08 = 807,326, \text{ А,}$$

где $k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi = 0,928$.

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 0,95}{28} = 8,55.$$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительно)

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{807,326}{3,3 \cdot 10^6} = 244,6, \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в литой клетке принимаем $J_2 = 3,3 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$. Паз ротора принимаем $b_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}$, $h_{\text{ш}} = 0,7 \text{ мм}$, $h'_{\text{ш}} = 0,3 \text{ мм}$.

При $B_{z2} = 1,8 \text{ Тл}$

$$b_{z2\text{don}} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,704 \cdot 0,016 \cdot 0,087}{1,8 \cdot 0,087 \cdot 0,97} = 10, \text{ мм.}$$

Размеры паза

$$b_1 = \frac{\pi(D_2 + 2h_{\text{ш}} - 2h'_{\text{ш}}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{Z_2 + \pi} = \frac{\pi(0,077 + 2 \cdot 0,5 - 2 \cdot 1) - 15 \cdot 6}{28 + \pi} = 11,789, \text{ мм};$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2 + \pi}{\pi} \right) - q_c \cdot 4}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{7,751 \cdot \left(\frac{28}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 0,94 \cdot 4}{\frac{28}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 8,073, \text{ мм};$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (7,751 - 1,31) \cdot \frac{15}{2 \cdot \pi} = 16,561, \text{ мм.}$$

Принимаем $b_1 = 12 \text{ мм}$, $b_2 = 8 \text{ мм}$, $h_1 = 17 \text{ мм}$. Полная высота паза:

$$h_{n2} = h'_{\text{ш}} + h_{\text{ш}} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,5 + 1 + \frac{7,751}{2} + 15,379 + \frac{1,31}{2} = 28, \text{ мм.}$$

Принимаем $h_{n2} = 28$. Сечение стержня

$$q_c = \left(\frac{\pi}{8} \right) \cdot (b_1^2 + b_2^2) + 0,5(b_1 + b_2)h_1 = 251,681, \text{ мм}^2.$$

Плотность тока в стержне

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{810,013}{251,681 \cdot 10^{-6}} = 3,208 \cdot 10^{-6}, \text{ А/м}^2.$$

Короткозамыкающие кольца. Площадь поперечного сечения

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{745,541}{2,896 \cdot 10^6} = 1000, \text{ мм}^2;$$

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{310,013}{0,416} = 3605, \text{ А},$$

где

$$\Delta = 2 \sin \frac{\alpha \cdot Z}{2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \sin \frac{\pi \cdot 2}{15} = 0,224;$$

$$J_{кл} = 0,85 J_2 = 0,85 \cdot 3,407 \cdot 10^6 = 2,727 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Размеры замыкающих колец:

$$b_{кл} = 1,25 \cdot h_{п2} = 1,25 \cdot 21 = 35 \text{ мм};$$

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{b_{кл}} = \frac{257,4}{26,25} = 37,779 \text{ мм};$$

$$q_{кл} = b_{кл} \cdot a_{кл} = 26,25 \cdot 9,807 = 1322 \text{ мм}^2;$$

$$D_{к.ср} = D_2 - b_{кл} = 77 - 26,25 = 166,44 \text{ мм}^2.$$

5 Расчёт намагничивающего тока

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,704 \cdot 1,05 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 1551, \text{ А},$$

где B_{δ} – индукция в воздушном зазоре, Тл, рассчитанная по окончательно принятому числу витков в фазе обмотки w_1 и обмоточному коэффициенту $k_{об1}$ определенному для принятой в машине обмотки. δ – воздушный зазор, м; k_{δ} – коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = \frac{14}{14 - 1,608 \cdot 0,4} = 1,099,$$

μ_0 – магнитная проницаемость: $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7}$, Гн/м.

При

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{u1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{u1}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{1,5}{0,4}\right)^2}{5 + \frac{1,5}{0,4}} = 1,333$$

Значения индукций в зубьях:

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot t_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,704 \cdot 14 \cdot 87}{6 \cdot 0,087 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 1,6, \text{ Тл};$$

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot t_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,704 \cdot 16 \cdot 87}{6 \cdot 0,087 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 1,8, \text{ Тл};$$

t_1 и t_2 – ширина зубца ротора, м.

Индукция в ярме статора и ярме ротора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot t_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,005}{2 \cdot 20 \cdot 0,087 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 1,4, \text{ Тл};$$

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot t_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,005}{2 \cdot 16,256 \cdot 0,087 \cdot 10^3 \cdot 0,97} = 1,139, \text{ Тл};$$

где k_c – коэффициент заполнения сердечника ротора сталью; h'_j – расчетная высота ярма ротора, м.

Расчетная высота ярма ротора при $2p = 2$ и $2p = 4$ определяется

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2 \cdot 2} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{\Pi 2} \right) - \frac{2}{3} \cdot d_{k2} \cdot m_{k2} = \frac{2+1}{3,2 \cdot 2} \cdot \left(\frac{0,077 \cdot 10^3}{2} - 21 \right) = 68,175, \text{ мм.}$$

Магнитные напряжения зубцовых зон статора и ротора

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 850 = 65,616, \text{ А};$$

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 21 \cdot 10^{-3} \cdot 1520 = 82,688 \text{ А.}$$

Где h_{z1} и h_{z2} – расчетная высота зубца статора: $h_{z1} = h_{\Pi 1} = 0,039$ мм;
 $h_{z2} = h_{\Pi 2} - 0,1 \cdot b_2 = 27$, мм.

H_{z2} – расчетная напряженность поля в зубце, А.

Напряженность поля в зубце определяют по кривым намагничивания для зубцов принятой при проектировании марки стали.

Для стали 2013 $H_{z1} = 850$ А/м при $B_{z1} = 1,6$ Тл; $H_{z2} = 1520$ А/м при $B_{z2} = 1,8$ Тл.

Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{26,641 + 63,445}{470,104} = 1,192$$

Полученное значение k_z позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины.

Магнитные напряжения ярм статора и ротора

$$F_a = L_a \cdot H_a = 202 \cdot 10^{-3} \cdot 400 = 80,997 \text{ А};$$

Где L_a – длина средней магнитной силовой линии в ярме статора:

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,149 - 0,02)}{2 \cdot 1} = 202 \text{ мм};$$

где h_a – высота ярма статора, м.

H_a – напряженность поля при индукции B_a по кривой намагничивания для ярма, принятой при проектировании стали.

Для стали 2013 $H_a = 400 \text{ А/м}$ при $B_a = 1,4 \text{ Тл}$.

Для стали 2013 $H_j = 1290 \text{ А/м}$ при $B_j = 1,73 \text{ Тл}$.

$$F_j = L_j \cdot H_j = 54 \cdot 10^{-3} \cdot 1290 = 69,858 \text{ А};$$

Где H_j – напряженность поля в ярме при индукции B_j по кривой намагничивания для ярма принятой при проектировании стали. Индукция в ярме ротора, Тл; L_j – длина силовых линий в ярме:

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,034 + 2,05 \cdot 10^{-4})}{2 \cdot 1} = 54, \text{ мм};$$

h_j – высота ярма ротора:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\Pi 2} = \frac{77 - 34}{2} - 21 = 2,05 \cdot 10^{-4}, \text{ мм}.$$

Магнитное напряжение на пару полюсов

F_{Π} – суммарное магнитное напряжение магнитной цепи (на пару полюсов)

$$F_{\Pi} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 470,104 + 26,641 + 63,445 + 80,997 + 69,858 = 711,044 \text{ А}.$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Pi}}{F_{\delta}} = \frac{711,044}{470,104} = 1,513.$$

Намагничивающий ток

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\Pi}}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{o\delta 1}} = \frac{1 \cdot 711,044}{0,9 \cdot 3 \cdot 216 \cdot 0,95} = 1,283, \text{ А}.$$

Относительное значение

$$I_{\mu^*} = \frac{I_{\mu}}{I_{1H}} = \frac{1,283}{4,07} = 0,315.$$

6 Параметры рабочего режима

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot 121,942 = 4,676 \text{ Ом.}$$

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная величина $\vartheta = 115^\circ \text{C}$.

Для меди $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{41} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Где L_1 – общая длина эффективных проводников

фазы обмотки: $L_1 = l_{\text{ср1}} \cdot w_1 = 0,565 \cdot 216 = 121,942 \text{ м}$.

При $l_{\text{ср1}} = 2 \cdot (l_{\text{пл}} + l_{\text{л}}) = 2 \cdot (0,087 + 0,196) = 0,565 \text{ м}$; $l_{\text{пл}} = l_1 = 0,087 \text{ м}$; $K_{\text{л}} = 1,2$;

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{КТ}} + 2 \cdot B = 1,2 \cdot 0,146 + 2 \cdot 0,01 = 0,196 \text{ м.}$$

$q_{\text{эф}}$ – площадь поперечного сечения эффективного проводника, м. Длина вылета лобовой части катушки

$$L_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} \cdot b_{\text{КТ}} + B = 0,26 \cdot 0,146 + 0,01 = 0,048 \text{ м,}$$

где $K_{\text{выл}} = 0,26$; $b_{\text{КТ}}$ – средняя ширина катушки:

$$b_{\text{КТ}} = \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{пл}})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = \frac{\pi \cdot (0,077 + 16)}{2 \cdot 1} = 0,146 \text{ м.}$$

β_1 – укорочение шага обмотки ротора; $K_{\text{выл}}$ – коэффициент, значение которого берут из таблицы в зависимости от числа полюсов машины и наличия изоляции в лобовых частях; B – длины вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части: $B = 0,01 \text{ м}$.

Относительное значение

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 4,676 \cdot \frac{4,07}{220} = 0,087.$$

Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 4,648 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 2,043 \cdot 10^{-6}}{0,416^2} = 7,011 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

При $k_r = 1$

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_2}{q_c} \cdot k_r = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,087}{90,986 \cdot 10^{-6}} = 4,648 \cdot 10^{-5} \text{ Ом;}$$

$$r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{\pi \cdot 0,051}{15 \cdot 257,423 \cdot 10^{-6}} = 2,043 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

где для литой алюминиевой обмотки ротора $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{м.}$ $D_{кл.ср}$ – средний диаметр замыкающих колец:

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} = 77 - 25,2 = 51 \text{ мм;}$$

q_c – сечение стержня, м^2 ; $k_r = 1$ – коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока; $q_{кл}$ – площадь поперечного сечения замыкающего кольца, м^2 ; ρ_{115} – удельное сопротивление материала стержня и замыкающих колец, при расчетной температуре.

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 7,011 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (216 \cdot 0,95)^2}{15} = 2,362 \text{ Ом.}$$

Относительное значение

$$r_{2*}' = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2,362 \cdot \frac{4,07}{220} = 0,044.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$\begin{aligned} x_1 &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta'}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{m1} + \lambda_{\pi 1} + \lambda_{d1}) = \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{216}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,087}{1 \cdot 3} \cdot (1,706 + 1,385 + 1,951) = 5,37 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

где

$$\lambda_{m1} = \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) \cdot k_\beta' = \frac{11,499}{3 \cdot 13} \cdot 1 + \left(0 + \frac{3 \cdot 5,75}{13 + 2 \cdot 1,5} + \frac{0,5}{1,5} \right) \cdot 1 = 1,706;$$

При $h_3 \approx h_{\text{п.к}} = 11,499 \text{ мм}$; $b = b_1 = 13 \text{ мм}$; $h_2 = 0$;

$$h_1 = 0,5 \cdot (b_1 - b_{\text{ш}}) = 0,5 \cdot (13 - 1,5) = 5,75 \text{ мм};$$

$$k_\beta = 1; k_\beta' = 1; l_\delta' = l_\delta = 0,087 \text{ м}.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{\pi 1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_\delta'} \cdot (l_\pi - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{3}{0,087} \cdot (0,196 - 0,64 \cdot 122 \cdot 10^{-3}) = 1,385,$$

где q – число пазов на полюс и фазу; l_n – длина лобовой части витка обмотки; β – укорочение шага обмотки, для которой проводится расчет, т. е. обмотки статора или фазного ротора.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния для обмоток статора и фазного ротора

$$\lambda_{\mathcal{D}1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{14}{12 \cdot 0,4 \cdot 1,05} \cdot 0,727 = 1,951;$$

$$\xi = 2 \cdot k'_{ck} \cdot k_{\beta} - k_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ck}^2) = 2 \cdot 1 \cdot 1 - 0,95^2 \cdot \left(\frac{16}{14} \right)^2 \cdot (1 + 0) = 0,727.$$

Для $\beta_{ck} = 0$ и $\frac{t_2}{t_1} = 1,188$, $k'_{ck} = 1$. Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 5,37 \cdot \frac{4,07}{220} = 0,099.$$

Индуктивное сопротивление фазы ротора

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{\mathcal{D}2} + \lambda_{\mathcal{D}2} + \lambda_{\mathcal{D}2}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50_1 \cdot 0,133 \cdot (3,592 + 1,198 + 2,259) \cdot 10^{-6} = \\ &= 370,985 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом;} \end{aligned}$$

где

$$\lambda_{\mathcal{D}2} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot b} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b^2}{2 \cdot b} \right) + 0,66 - \frac{b_{III}}{2 \cdot b} \right] \cdot k_{\mathcal{D}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} + 1,12 \cdot \frac{h'_{III} \cdot 10^6}{I_2} =$$

$$= \left[\frac{17,2}{3 \cdot 7,6} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot (7,6)^2}{8 \cdot 90,986} \right) + 0,66 - \frac{1}{2 \cdot 7,6} \right] \cdot 1 + \frac{0,5}{1} + 1,12 \cdot \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{310,013} = 5,132$$

при $h_1 = h_{II} - h_{III} - h'_{III} - 0,1 \cdot b_2 \approx h_{II} - 0,5 \cdot b_1 = 21 - 0,5 \cdot 7,6 = 17,2$ мм; $b_{III} = 1$ мм; $b = b_1 = 7,6$ мм; $h_{III} = 0,5$; мм; $h'_{III} = 1$ мм; $q_c = 90,986$ мм²; $k_D = 1$ (для рабочего режима).

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{кл.ср}}{a_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} = \frac{2,3 \cdot 50,43 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 0,087 \cdot 0,416^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 50,43 \cdot 10^{-3}}{9,807 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 26,25 \cdot 10^{-3}} = 1,454,$$

$D_{кл.ср}$ – средний диаметр замыкающих колец, м; q_c – сечение стержня, м²; Δ – коэффициент приведения токов в кольце к току в стержне; $a_{кл}$ и $b_{кл}$ – средние высота и ширина колец.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки, короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{Д2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{19,181}{12 \cdot 0,4 \cdot 1,05} \cdot 1 = 3,187;$$

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

$$\text{т.к. } \Delta_z \approx 0, \quad \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 \approx 0;$$

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2} = 5,132 + 0,299 + 3,187 = 4,73.$$

Приводим x_2 к числу витков обмотки статора

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 2,951 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (216 \cdot 0,95)^2}{15} = 0,206 \text{ Ом.}$$

Относительное значение

$$x_{2*}' = x_2' \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 9,94 \cdot \frac{4,07}{220} = 0,095 .$$

7 Расчёт потерь

Основные потери в стали

$$P_{CT.OCH} = \rho_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{\Delta a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\Delta z} \cdot B_{Z1}^2 \cdot m_{z1}) =$$
$$= 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,4^2 \cdot 5,336 + 1,8 \cdot 1,6^2 \cdot 1,135) = 741,992, \text{ Вт},$$

где $\rho_{1,0/5,0} = 2,55 \text{ Вт/кг}$ – удельные потери; B_a и B_{Z1} – индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора, Тл; m_a , m_{z1} – масса стали ярма и зубцов статора:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = \pi \cdot (0,149 - 0,02) \cdot 0,02 \cdot 0,087 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 71,637 \text{ кг};$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1cp} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 0,016 \cdot 0,006 \cdot 18 \cdot 0,087 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 14,393 \text{ кг},$$

где h_a – высота ярма статора:

$$h_a = 0,5 \cdot (D_a - D) - h_{\Pi 1} = 0,5 \cdot (0,392 - 0,077) - 0,016 = 0,055 \text{ мм};$$

h_{z1} – расчетная высота зубца статора, м; b_{z1cp} – средняя ширина зубца статора, м; γ_c – удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\beta = 1,5$ – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания; $k_{\Delta a}$ и $k_{\Delta z}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов: $k_{\Delta z} = 1,8$, $k_{\Delta a} = 1,6$.

Поверхностные потери в роторе

$$P_{ПОВ2} = p_{ног2} \cdot (t_2 - b_{ш2}) \cdot Z_2 \cdot l_{см2} = 54,16 \cdot (12 - 1,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 15 \cdot 0,087 = 15,224 \text{ Вт};$$

При

$$p_{ног2} = 0,5 \cdot k_{o2} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{o2} \cdot t_1)^2 = 0,5 \cdot 1,5 \cdot \left(\frac{18 \cdot 3000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,177 \cdot 14)^2 = 320,791 \text{ Вт},$$

где $k_{o2} = 1,5$.

$$B_{o2} = \beta_{o2} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0,24 \cdot 1,05 \cdot 0,704 = 0,195 \text{ Тл},$$

где для $\frac{b_{ш}}{\delta} = \frac{1,5}{0,4} = 3,333$, $\beta_{o2} = 0,24$.

Пульсационные потери в зубцах ротора

$$P_{ПВЛ2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{1000} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{18 \cdot 3000}{1000} \right)^2 \cdot 1,338 = 169,46 \text{ Вт};$$

m_{z2} — масса стали зубцов ротора:

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{см2} \cdot k_{c2} = 15 \cdot 0,021 \cdot 0,006 \cdot 0,087 \cdot 7,566 \cdot 10^3 = 9,172 \text{ кг}.$$

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов для зубцов ротора $B_{ПВЛ2} = \frac{\gamma \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{z2} = \frac{1,608 \cdot 0,4}{2 \cdot 0,012} \cdot 1,8 = 0,12 \text{ Тл};$

B_{z2} — средняя индукция в зубцах ротора, Тл; при $\gamma = 1,68$.

Сумма добавочных потерь в стали

$$P_{ст.доб} = P_{ПОВ2} + P_{ПВЛ2} = 15,224 + 169,46 = 184,683 \text{ Вт}.$$

Полные потери в стали

$$P_{CT} = P_{CT.OCH} + P_{CT.ДОБ} = 56,006 + 184,683 = 926,675 \text{ Вт.}$$

Обычно $P_{CT.ДОБ}$ приблизительно в 5–8 раз меньше, чем $P_{CT.OCH}$.

Механические потери

$$P_{МЕХ} = K_T \cdot \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 = 1 \cdot \left(\frac{3000}{10}\right)^2 \cdot 0,149^4 = 2125 \text{ Вт,}$$

Для двигателей с $2p = 2$ коэффициент $K_T = 1$.

Добавочные потери при номинальном режиме

$$P_{ДОБ.H} = 0,005 \cdot P_{1H} = 0,005 \cdot \frac{P_{2H}}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{55000}{0,9} = 305,556 \text{ Вт;}$$

где η – коэффициент полезного действия двигателя.

Холостой ход двигателя: Ток холостого хода двигателя

$$I_{x.x} \approx \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,19^2 + 1,283^2} = 20,51 \text{ А;}$$

При определении активной составляющей тока холостого хода принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе двигателя такие же, как и при номинальном режиме. Тогда

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{CT} + P_{МЕХ} + P_{\text{эл}x.x}}{m \cdot U_{1H}} = \frac{57,779 + 44,36 + 23,107}{3 \cdot 220} = 4,732 \text{ А;}$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными: $P_{\text{эл}x.x} \approx 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 1,283^2 \cdot 4,676 = 71,422 \text{ Вт;}$

Реактивная составляющая тока холостого хода:

$$I_{x.x.b} \approx I_{\mu}.$$

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{x.x} = \frac{I_{x.x.a}}{I_{x.x}} = \frac{0,19}{1,297} = 0,231.$$

8 Расчёт рабочих и пусковых характеристик

Найдём расчетное сопротивление r_{12} и сопротивление взаимной индуктивности x_{12} :

$$r_{12} \approx \frac{P_{ст.осн}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{56,006}{3 \cdot 1,283^2} = 0,621, \text{ Ом};$$

$$x_{12} \cong \frac{U_{1н}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{1,283} - 5,37 = 10,805, \text{ Ом}.$$

Комплексный коэффициент c_1 находим по приближённой формуле, так как $|\gamma| < 1^\circ$:

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 x_{12} - r_{12} x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} = 0,004^\circ;$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{5,37}{166,052} = 1,02.$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1н}} = \frac{56,006 + 3 \cdot 1,283^2 \cdot 4,676}{3 \cdot 220} = 1,232, \text{ А}.$$

Найдём расчетные величины, обозначенные в формуляре а, а', b и b'. Формулы для их определения зависят от принятого (точного или приближенного) метода расчета c_1 . Если $|\gamma| < 1^\circ$, то можно использовать приближенный метод:

$$a' = c_1^2 = 1,032^2 = 1,041, \text{ Ом};$$

$$b' = 0, \text{ Ом};$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1,032 \cdot 4,676 = 0,061, \text{ Ом};$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2) = 1,032 \cdot (5,37 + 1,032 \cdot 9,94) = 0,437, \text{ Ом}.$$

Потери, не меняющиеся при изменении скольжения:

$$P_{cm} + P_{mex} = 57,779 + 44,36 = 3052 \text{ Вт}.$$

Принимаем $s_n \approx r'_2 = 0,019$ и рассчитываем рабочие характеристики, задаваясь $s = 0,005; 0,0075; 0,01; 0,0125; 0,015; 0,0175; 0,019$. Результаты расчёта сведены в таблицу 1, по которой уточняется скольжение s_n . Номинальные данные спроектированного двигателя: $P_{2H} = 55\text{ кВт}$, $U_{1H} = 220 \text{ В}$, $I_{1H} = 101,75\text{ А}$, $\cos \varphi_H = 0,91$, $\eta_H = 0,90$.

Таблица 1 – Результат расчета рабочих характеристик АД

Формула	Ед.и зм	Скольжение						
		0,005	0,0075	0,01	0,0125	0,015	0,0175	$s_n =$ 0,019
$a' \cdot r'_2 / s$	Ом	8,328	5,552	4,164	3,3312	2,776	2,3794 3	2,1915 8
$b' \cdot r'_2 / s$	Ом	0	0	0	0	0	0	0
$R = a + a' \cdot r'_2 / s$	Ом	8,389	5,613	4,225	3,3922	2,837	2,4404 3	2,2525 8
$X = b + b' \cdot r'_2 / s$	Ом	0,437	0,437	0,437	0,437	0,437	0,437	0,437
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	8,4003 7	5,6299 9	4,2475 4	3,4202 3	2,8704 6	2,4792 5	2,2945 8
$I_2^* = U_{1H} / Z$	А	26,189	39,076	51,794	64,323	76,642	88,736	95,878

		3	5	7	1	8	7	3
$\cos \varphi_2' = R / Z$	—	0,9986 5	0,9969 8	0,9946 9	0,9918	0,9883 4	0,9843 4	0,9817
$\sin \varphi_2' = X / Z$	—	0,0520 2	0,0776 2	0,1028 8	0,1277 7	0,1522 4	0,1762 6	0,1904 5
$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos \varphi$	A	27,385 8	40,190 6	52,751 8	65,027 9	76,981 4	88,579 3	95,355 4
$I_{1p} = I_{0p} + I_2' \sin \varphi$	A	21,319 4	22,990 1	25,285 8	28,175 5	31,625 1	35,598	38,216 9
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	A	34,705 9	46,301 5	58,499	70,869 5	83,224 3	95,464 7	102,72 9
$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	A	26,713 1	39,858	52,830 6	65,609 6	78,175 6	90,511 4	97,795 8
$P_1 = 3U_{1H} I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	18,074 7	26,525 8	34,816 2	42,918 4	50,807 7	58,462 3	62,934 6
$P_{\varphi 1} = 3I_1^2 r_1' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,2168 1	0,3858 9	0,6159 8	0,9040 5	1,2467 3	1,6404 3	1,8995 7
$P_{\varphi 2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,0856 3	0,1906 4	0,3349 3	0,5165 5	0,7333 7	0,9830 8	1,1476 8
$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \cdot (I_1 /$	кВт	0,0355 5	0,0632 7	0,101	0,1482 3	0,2044 2	0,2689 7	0,3114 6
$\Sigma P = P_{cm} + P_{mc}$ $+ P_{\varphi 1} + P_{\varphi 2} + P_{\text{доб}}$	кВт	3,3899 9	3,6918	4,1039 1	4,6208 3	5,2365 2	5,9444 8	6,4107 2
$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт	14,684 7	22,834	30,712 3	38,297 6	45,571 2	52,517 9	56,523 9
$\eta = 1 - \Sigma P / P$	—	0,8124 5	0,8608 2	0,8821 3	0,8923 3	0,8969 3	0,8983 2	0,8981 4
$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	—	0,7890 83	0,8680 19	0,9017 57	0,9175 72	0,9249 87	0,9278 75	0,9282 26

Построение рабочих характеристик приведено на рисунках 1–4.

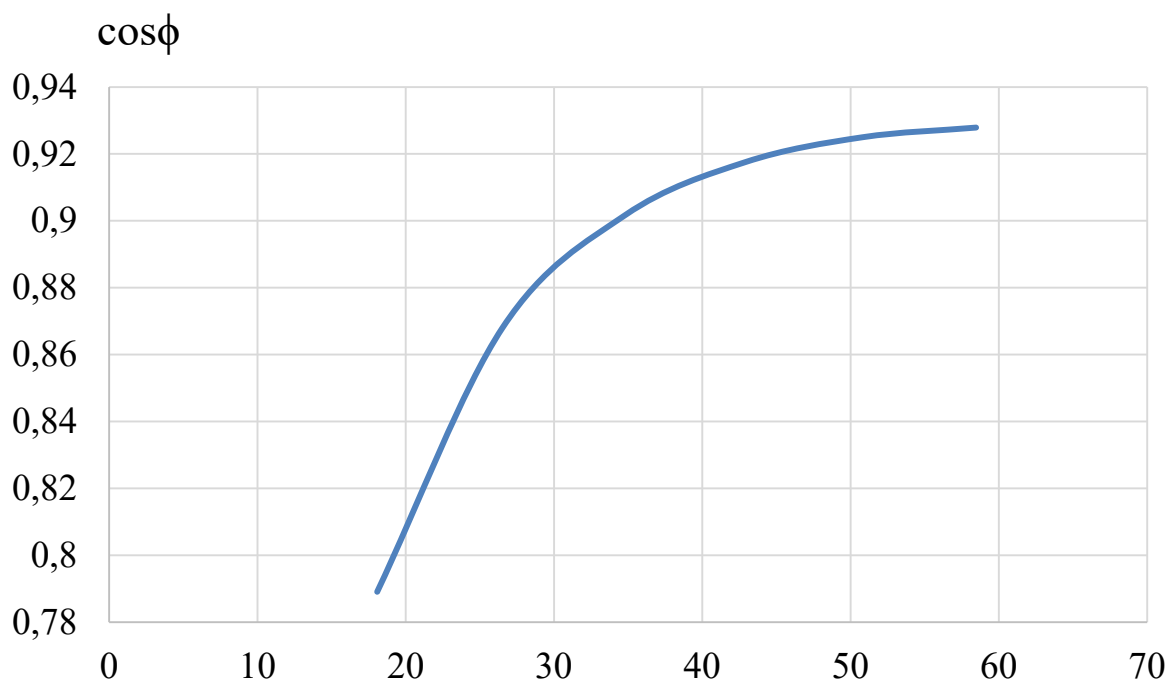


Рисунок 1 – Зависимость $\cos\phi$ от P_1

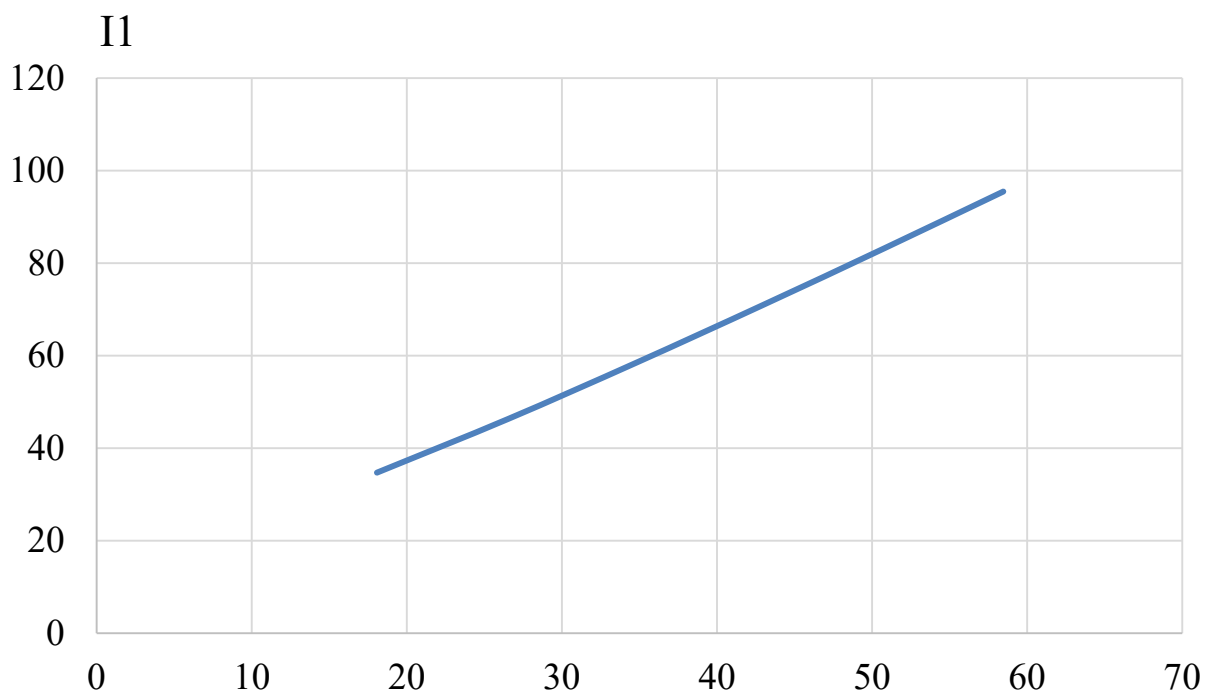


Рисунок 2 – Зависимость I_1 от P_1

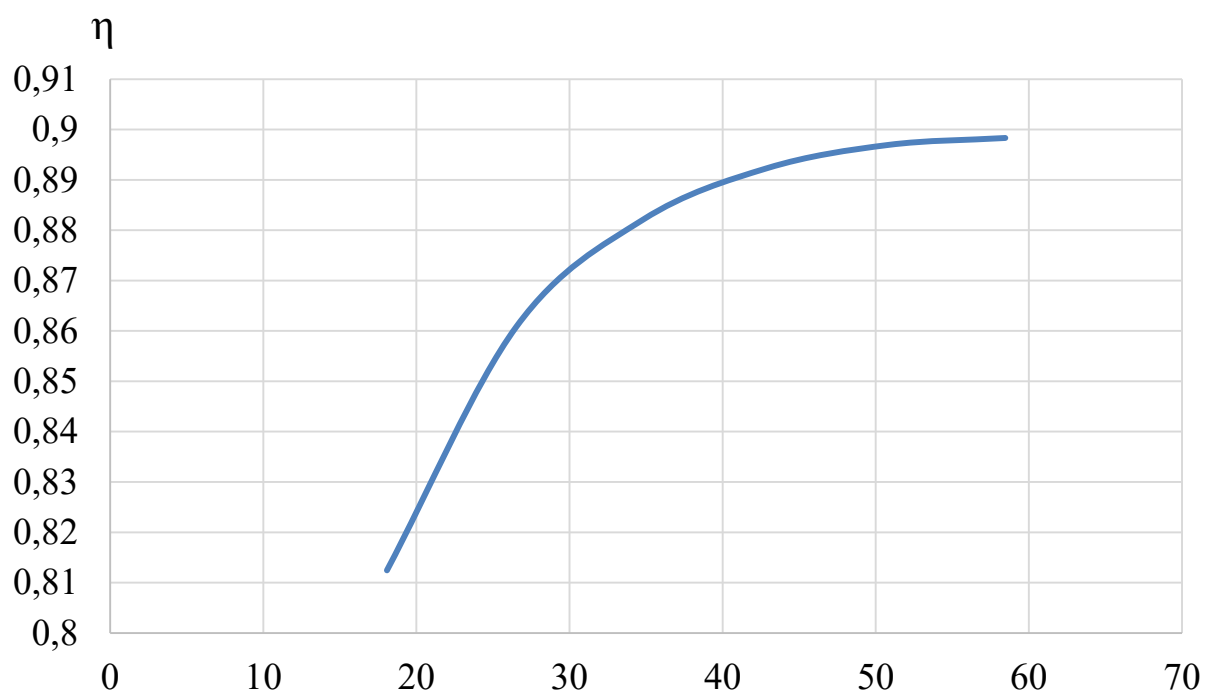


Рисунок 3 – Зависимость η от P_1

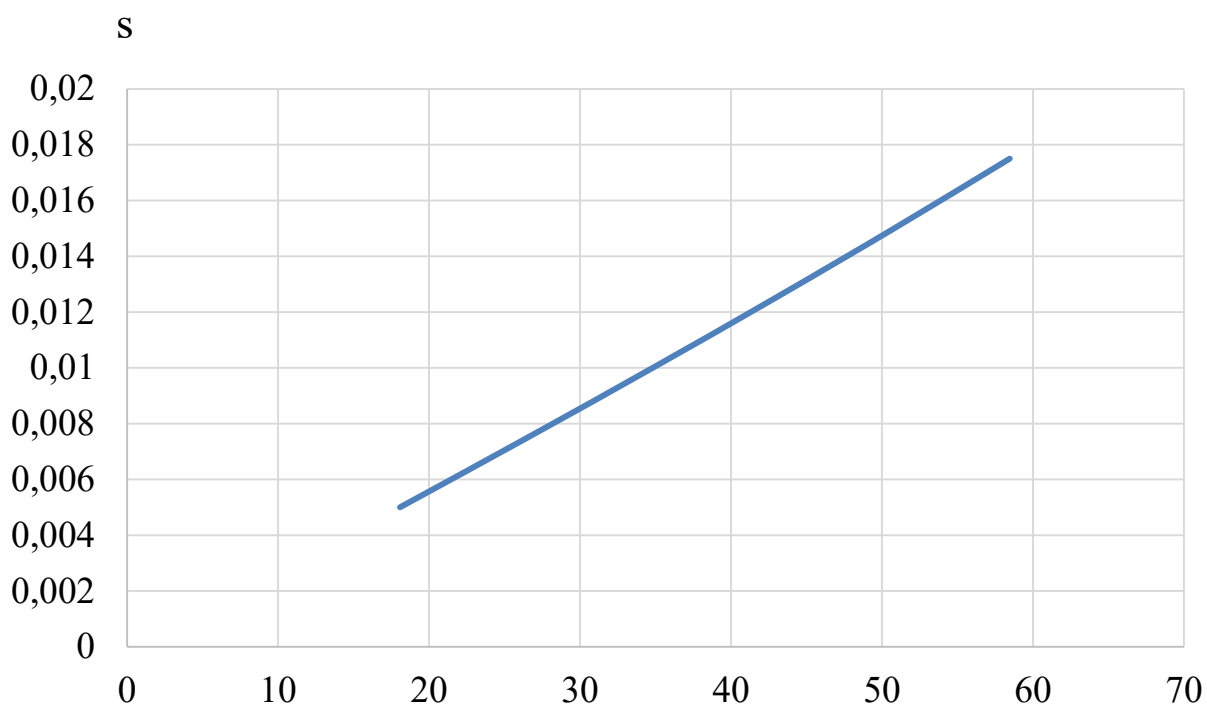


Рисунок 4 – Зависимость s от P_1

Расчёт пусковых характеристик. Рассчитываем точки характеристик, соответствующие скольжениям $s = 1; 0,8; 0,5; 0,2; 0,1$. Данные расчёта точек сведены в таблицу 2. Подробный расчёт приведён для скольжения $s = 1$.

Таблица 2 – Данные расчёта пусковых характеристик АД

Расчетная формула	Ед.изм	Скольжение s					
		1	0,8	0,5	Скр=0,24	0,2	0,1
ξ	—	1,972	1,764	1,444	0,831	0,831	0,624
φ	—	0,86	0,59	0,27	0,54	0,54	0,135
$k_r = q_c / q_r$	—	1,592	1,394	1,169	1,358	1,358	1,079
$K_R = \frac{1+r_c(k_r-1)}{r_2'}$	—	1,4	1,266	1,114	1,242	1,242	1,054
$r_{2\xi} = K_R r_2'$	Ом	0,793	0,717	0,631	0,704	0,704	0,597
$k_{\text{Д}}$	—	0,75	0,82	0,9	0,95	0,95	0,98
$K_X = \sum \lambda_{2\xi} / \sum \lambda_2$	—	0,782	0,801	0,824	0,838	0,838	0,847
$x_{2\xi} = K_X x_2'$	Ом	1,116	2,372	2,439	2,481	2,481	2,506
$x_{2\xi\text{нас}}' = \frac{x_2' \sum \lambda_{2\xi\text{нас}}}{\sum \lambda_2}$	Ом	1,633	1,643	1,654	1,667	1,667	1,696
$x_{1\text{нас}} = \sum \lambda_{1\text{нас}} / \sum \lambda_1$	Ом	0,631	0,633	0,638	0,642	0,642	0,672
$c_{1\Pi.\text{нас}} = 1 + x_{1\text{нас}} / x_{12n}$	—	1,005	1,005	1,0051	1,0051	1,0051	1,0053
$a_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi.\text{нас}} r_{2\xi}' / s$	Ом	1,902	2,006	2,374	4,641	4,641	7,105
$b_{\Pi} = \frac{x_{1\text{нас}} + c_{1\Pi.\text{нас}} r_{2\xi}'}{s}$	Ом	2,273	2,274	2,3	2,317	2,317	2,377
$I_2' = \frac{U_{1H}}{\sqrt{a_{\Pi}^2 + b_{\Pi}^2}}$	А	128,217	125,3	114,95	73,257	73,257	50,721

$I_1 = \frac{I_2' \sqrt{a_{II}^2 + (b_{II} + x_{12n})^2}}{c_{1n} x_{12n}}$	A	104,65 4	102,43	94,547	63,731	63,731	48,19 5
$I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1H}}$	—	6,51	6,1	5,49	5,21	5,01	4,4
$M_* = \left(\frac{I_2'}{I_{2H}'} \right)^2 K_R \frac{s_H}{s}$	—	1,71	1,8	2,01	2,326	2,291	2,052

Построение пусковых характеристик приведено на рисунках 5, 6.

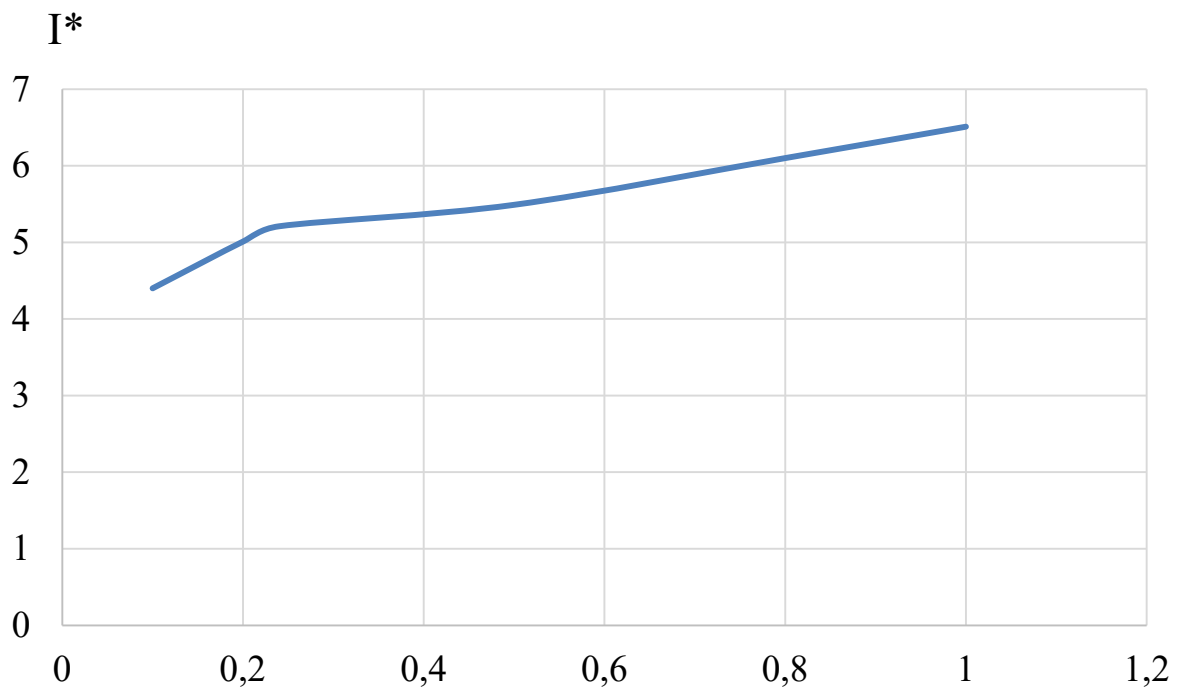


Рисунок 5 – Зависимость I* от s

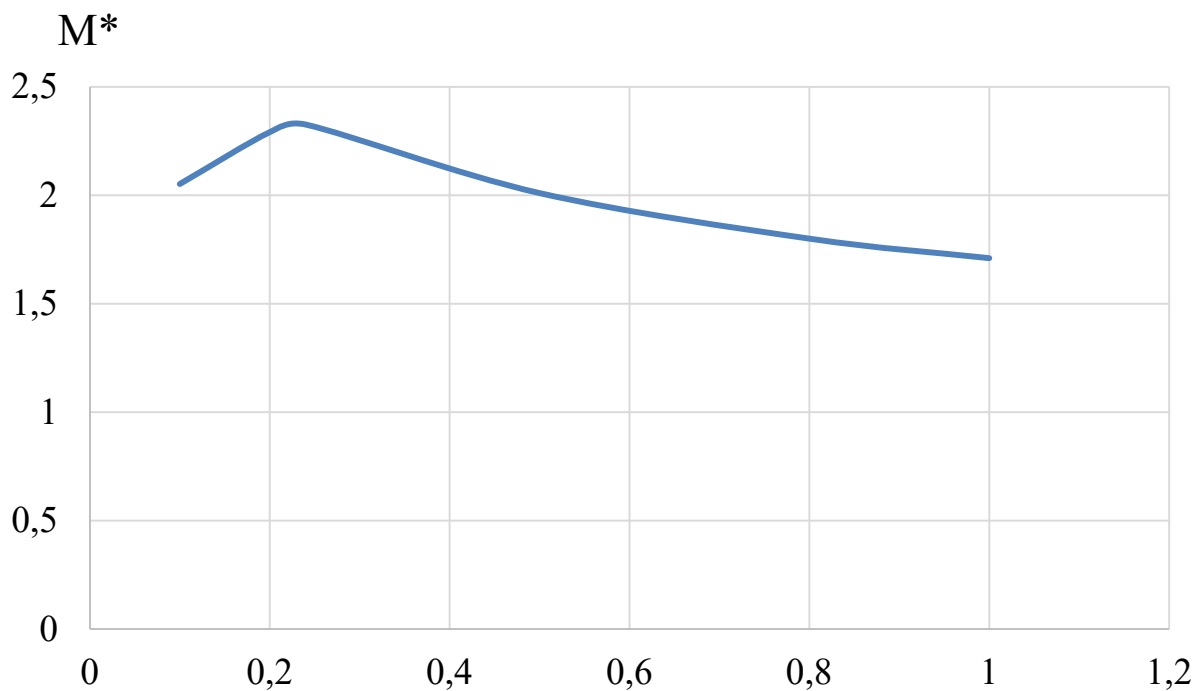


Рисунок 6 – Зависимость M^* от s

Параметры находятся с учётом вытеснения тока $\vartheta_{расч} = 115^\circ C$. Вычислим ξ – приведенную высоту стержня

$$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s} = 63,61 \cdot 0,0215 \cdot \sqrt{1} = 1,368,$$

где h_c – высота стержня в пазу

$$h_c = h_n - (h_{ui} + h'_{ui}) = 29 - (0,7 + 0,3) = 21,5, \text{ мм.}$$

Для $\xi = 1,368$ $\varphi = 0,25$, $\varphi' = k_d = 0,93$, где k_d – коэффициент демпфирования.

В расчетах условно принимают, что при действии эффекта вытеснения ток ротора распределен равномерно, но не по всему сечению стержня, а лишь по его верхней части, ограниченной высотой h_r , имеющей сечение q_r

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{21,5}{1 + 0,25} = 17, \text{ мм};$$

$$qr = \frac{\pi b_2^2}{8} + \frac{b_2 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right) = \frac{\pi \cdot 7,6^2}{8} + \frac{7,6 + 2,046}{2} \left(17 - \frac{7,6}{2} \right) = 87,311, \text{ мм}^2;$$

$$br = b_2 - \frac{b_2 - b_1}{h_1} \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right) = 7,6 - \frac{7,6 - 1,3}{15,2} \left(17 - \frac{7,6}{2} \right) = 2,046, \text{ мм}.$$

Коэффициент k_r показывает, на сколько увеличилось активное сопротивление пазовой части стержня $r_{c\xi}$ при неравномерной плотности тока в нем по сравнению с его сопротивлением r_c при одинаковой плотности по всему сечению стержня

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{90,986}{87,311} = 1,042.$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1) = 1 + \frac{4,648 \cdot 10^{-5}}{7,011 \cdot 10^{-5}} (1,042 - 1) = 1,028.$$

Приведённое активное сопротивление ротора с учётом действия эффекта вытеснения тока:

$$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2 = 1,028 \cdot 2,362 = 2,428, \text{ Ом}.$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора $x'_{2\xi}$ при $\varphi' = k_d = 0,93$. Для его расчёта найдём сначала коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{n2\xi} = \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_u}{2b} \right] k_\phi + \frac{b_u}{h_u} + 1,12 \frac{h'_u \cdot 10^6}{I_2} =$$

$$= \left[\frac{17,2}{3 \cdot 7,6} \left(1 - \frac{\pi \cdot 7,6^2}{8 \cdot 90,986} \right)^2 + 0,66 - \frac{1}{2 \cdot 7,6} \right] \cdot 1 + \frac{1}{0,5} + 1,12 \frac{1 \cdot 10^3}{6,5 \cdot 310,013} = 3,504.$$

при $s=1$ предварительно принимаем $\frac{I_{2n}}{I_{2n}} \approx 6,5$;

K_x – изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{\phi 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\phi 2}} = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2} = \frac{6,99}{8,618} = 0,811;$$

$$x'_{2\xi} = x'_{2} K_x = 9,94 \cdot 0,811 = 8,062, \text{ Ом.}$$

Ток ротора без учёта влияния насыщения, принимая $c_{1n} = 1$

$$I'_2 = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2}} = \frac{220}{\sqrt{(4,676 + 2,428)^2 + (5,37 + 8,062)^2}} = 14,478, \text{ А.}$$

Учёт влияния насыщения на параметры. Принимаем для $s = 1$ коэффициент насыщения $k_{\text{нас}} = 1,35$ и $I_1 \approx I_2$ и приводим расчёт для $k_{\text{нас}} I_1 = 1,35 \cdot 14,478 = 19,545$ А. Для меньших $s k_{\text{нас}}$ снижают до 1,1.

Средняя МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора

$$F_{n.c.p} = 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_1 u_n}{a} \left(k'_\beta + k_y k_{\phi 1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) =$$

$$= 0,7 \frac{1,35 \cdot 14,478 \cdot 144}{2} \left(1 + 1 \cdot 0,95 \cdot \frac{18}{15} \right) = 2108, A,$$

где I_1 – ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения; a – число параллельных ветвей обмотки статора; $u_{\text{пл}}$ – число эффективных проводников в пазу статора; k'_β – коэффициент, учитывающий уменьшение МДС паза; k_y – коэффициент укорочения шага обмотки.

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n, \text{cp}}}{1,6\delta C_N} \cdot 10^{-6} = \frac{2108}{1,6 \cdot 0,4 \cdot 0,953} \cdot 10^{-6} = 3,457, \text{ Тл},$$

где коэффициент

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,4}{14 + 12}} = 0,953$$

при $B_{\phi\delta} = 3,457$ Тл $\kappa_\delta = 0,65$.

Значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора

$$c_1 = (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - \kappa_\delta) = (14 - 1,5) \cdot (1 - 0,65) = 4,208, \text{ мм}.$$

Для полузакрытого паза высота клиновой части паза

$$h' = 0,5 \cdot (b_2 - b_u) = 0,5 \cdot (7,6 - 1,3) = 3,15, \text{ мм};$$

$$\Delta \lambda_{n1 \text{ нас}} = \frac{h_{u1} + 0,58h'}{b_{u1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + b_{u1}} = \frac{0,5 + 0,58 \cdot 3,15}{1,5} \cdot \frac{4,208}{4,208 + 1,5} = 1,143.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} = 1,706 - 1,143 = 0,563,$$

где λ_{n1} – проводимость, рассчитанная без учета насыщения.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$\lambda_{o1нас} = \lambda_{o1} \kappa_{\delta} = 1,951 \cdot 0,65 = 1,268.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} = 5,37 \cdot \frac{3,216}{5,042} = 3,425, \text{ Ом};$$

$$\sum \lambda_{1нас} = \lambda_{n1нас} + \lambda_{o1нас} + \lambda_{л1} = 0,563 + 1,268 + 1,385 = 3,216.$$

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

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_2}{c_2 + b_{u2}} = \frac{0,5}{1} \cdot \frac{3,85}{3,85 + 1} = 0,397,$$

где c_2 – дополнительное раскрытие:

$$c_2 = (t_2 - b_{u2}) \cdot (1 - \kappa_{\delta}) = (12 - 0,5) \cdot (1 - 0,65) = 3,85, \text{ мм}.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для ротора

$$\lambda_{n2нас} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2нас} = 3,504 - 0,397 = 3,107.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения

$$\lambda_{o2нас} = \lambda_{o2} \kappa_{\delta} = 3,187 \cdot 0,65 = 2,071.$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния вытеснения тока и насыщения

$$x'_{2\xiнас} = x'_{2} \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xiнас}}{\sum \lambda_2} = 9,94 \cdot \frac{5,478}{8,618} = 6,318, \text{ Ом};$$

$$\sum \lambda_{2\xiнас} = \lambda_{2\xiнас} + \lambda_{o2нас} + \lambda_{r2} = 3,107 + 2,071 + 0,299 = 5,478.$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток в пусковом режиме

$$x_{12n} = x_{12} \cdot \frac{F_u}{F_{\delta}} = 166,052 \cdot \frac{711,044}{470,104} = 251,159, \text{ Ом}.$$

Расчёт токов и моментов, где для упрощения расчетных формул в отличие от обозначений в расчете рабочих характеристик принято:

$$c_{1нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}} = 1 + \frac{3,425}{251,159} = 1,014;$$

$$a_n = r_1 + c_{1нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 4,676 + 1,014 \cdot \frac{2,428}{1} = 7,137, \text{ Ом};$$

$$b_n = c_{1нас} \cdot x'_{2\xi нас} + x_{1нас} = 1,014 \cdot 6,318 + 3,425 = 9,829, \text{ Ом.}$$

Ток в обмотке ротора

$$I'_2 = \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} = \frac{220}{\sqrt{7,137^2 + 9,829^2}} = 18,111, \text{ А;}$$

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{a_n^2 + (b_n + x_{12н})^2}}{c_{1нас} x_{12н}} = 18,111 \cdot \frac{\sqrt{7,137^2 + (9,829 + 251,159)^2}}{1,014 \cdot 251,159} = 18,574, \text{ А.}$$

Характеризующие пусковые данные машины кратность тока и момента при заданном s

$$I_{n*} = \frac{I_{1н}}{I_{1н}} = \frac{18,574}{3,07} = 6,51;$$

$$M_{n*} = \left(\frac{I'_{2н}}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_n}{s_n} = \left(\frac{18,111}{16,385} \right)^2 \cdot 1,028 \cdot \frac{0,044}{1} = 1,71.$$

Относительные значения подходят.

Критическое скольжение определяется после расчета всех точек пусковых характеристик по средним значениям сопротивлений $x_{1нас}$ и $x_{2\xi нас}$, соответствующим скольжениям $s = 0,5 - 0,2$:

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{\frac{x_{1нас}}{c_{1нас}} + x'_{2\xi нас}} = \frac{2,362}{\frac{3,425}{1,014} + 6,318} = 0,244.$$

Максимальный момент двигателя вначале определяют по приближенному значению критического скольжения

$$M_{\max} = 2,326.$$

Кратности пускового момента и пускового тока спроектированного двигателя удовлетворяют ГОСТ 19523–74.

9 Тепловой расчет и расчет вентиляции

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta \vartheta_{\text{ноб1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{э.н1}} + P_{\text{см.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 0,19 \cdot \frac{485,904 + 56,006}{\pi \cdot 77 \cdot 10^{-3} \cdot 0,087 \cdot 140} = 13,276, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду $K=0,19$. Потери в пазовой части $P'_{\text{э.п1}}$:

$$P'_{\text{э.п1}} = k_p \cdot P_{\text{э1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{сп1}}} = 1,07 \cdot 1792 \cdot \frac{2 \cdot 0,087}{0,565} = 485,904, \text{ Вт},$$

где из таблицы 1 для s_n находим $P_{\text{э1}}=228$ Вт, коэффициент теплоотдачи с поверхности $\alpha_1=158$ Вт/(м²·°C); коэффициент увеличения потерь $k_p = 1,07$.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\begin{aligned} \Delta \vartheta_{\text{уз.н1}} &= \frac{P'_{\text{э.п1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_1} \left(\frac{b_{\text{уз.н1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = \\ &= \frac{485,904}{18 \cdot 53 \cdot 10^{-3} \cdot 0,087} \left(\frac{3,5 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{(13 + 8,845) \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 1,1} \right) = 3,177 \text{ } ^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

где расчетный периметр поперечного сечения паза статора:

$$\Pi_{\text{н1}} = 100 \text{ мм}.$$

Для изоляции класса F средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции $\lambda_{\text{экв}} = 0,16 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$; для $\frac{d}{d_{\text{из}}} = 0,95$ $\lambda'_{\text{экв}} = 1,3 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$.

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta \vartheta_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_1} \left(\frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\text{П1}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right) =$$

$$= \frac{1436}{2 \cdot 18 \cdot 53 \cdot 10^{-3} \cdot 0,087} \left(\frac{0}{0,16} + \frac{16 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1,1} \right) = 1,22 \text{ °C},$$

где потери в лобовых частях катушек $P'_{\text{эл1}}$:

$$P'_{\text{эл1}} = k_p \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср}}} = 1,07 \cdot 1792 \cdot \frac{2 \cdot 0,196}{0,565} = 1436 \text{ , Вт.}$$

Периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки $\Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{н1}} = 100 \text{ мм}$; односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки при отсутствии изоляции в лобовых частях $b_{\text{из.л1}} = 0$.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta \vartheta_{\text{нов.л1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{выл}} \cdot \alpha_1} = 0,19 \cdot \frac{485,904}{2 \cdot \pi \cdot 77 \cdot 10^{-3} \cdot 0,048 \cdot 170} = 3,89 \text{ , °C.}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta \vartheta'_1 = \frac{(\Delta \vartheta_{\text{нов1}} + \Delta \vartheta_{\text{из.н1}}) \cdot 2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} + \frac{(\Delta \vartheta_{\text{нов.л1}} + \Delta \vartheta_{\text{из.л1}}) \cdot 2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} =$$

$$= \frac{(8,421 + 3,377) \cdot 2 \cdot 0,087}{0,565} + \frac{(4,347 + 0,536) \cdot 2 \cdot 0,196}{0,565} = 7,978^{\circ}\text{C}.$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды:

$$\Delta \vartheta_{\epsilon} = \frac{\sum P'_{\epsilon}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\epsilon}} = \frac{296,146}{0,334 \cdot 19} = 58,915, ^{\circ}\text{C},$$

где $\sum P'_{\epsilon}$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя и $\sum P'$ – сумма всех потерь в двигателе при номинальном режиме и расчетной температуре:

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

$$= 442,12 - (1 - 0,19) \cdot (74,921 + 56,006) - 0,9 \cdot 44,36 = 3320, \text{Вт}$$

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) = 420 + (1,07 - 1)(228 + 88) = 6227, \text{Вт}.$$

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса:

$$S_{\text{кор}} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{был.л1}}) = (\pi \cdot 0,149 + 8 \cdot 0,56) \cdot (0,087 + 2 \cdot 0,048) = 2,167, \text{м}^2.$$

Условный периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя $\Pi_p = 0,56 \text{ м}^2$, коэффициент подогрева воздуха $\alpha_{\text{в}} = 26 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta'_1 + \Delta \vartheta_{\epsilon} = 7,007 + 53,655 = 66,892, ^{\circ}\text{C}.$$

Значение находится в допустимых пределах.

Расчет вентиляции, требуемой для охлаждения расход воздуха:

$$Q_{\epsilon} = \frac{k_m \cdot \sum P'_{\epsilon}}{1100 \cdot \Delta \vartheta_{\epsilon}} = \frac{6,343 \cdot 296,146}{1100 \cdot 46,649} = 0,527, \text{ м}^3/\text{с},$$

где k_m – коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором:

$$k_m = m \cdot \sqrt{\frac{n_1}{100} \cdot D_a} = 3 \cdot \sqrt{\frac{3000}{100} \cdot 0,392} = 10,288.$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором:

$$Q'_{\epsilon} = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n_1}{100} = 0,6 \cdot 0,392^3 \cdot \frac{3000}{100} = 1,084, \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расход воздуха Q'_v должен быть больше требуемого для охлаждения машины Q_{ϵ} :

$$Q'_{\epsilon} > Q_{\epsilon}.$$

Заключение

В курсовом проекте проведен расчет асинхронного двигателя в соответствии с техническим заданием.

Спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ по энергетическим показателям $\cos\varphi_n = 0,91$; КПД = 0,90. Получены следующие параметры: $M^*_n = 1,71$; $I^*_n = 6,51$; $s_n = 0,019$; $s_{кр} = 0,244$; $\Delta Q_1 = 53,655$. Постоянная Арнольда C_A получилась как у базового двигателя ($\alpha_\delta = 0,64$):

$$C_A = \frac{2}{\pi B_\delta A k_{об1} k_B \alpha_\delta} = \frac{l_\delta D^2 \omega}{P} = \frac{0,087 \cdot 0,077 \cdot 216}{2632} = 4,28 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Вт}).$$

По пусковым характеристикам видно, что кратности пускового момента и пускового тока спроектированного двигателя удовлетворяют ГОСТ 19523-74.

Превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды не превосходит 100 °С. Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

Спроектированный двигатель отвечает поставленным в техническом задании требованиям.

Список источников

1. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. М.: Энергия, 1980. 496 с.
2. Проектирование электрических машин: Учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2002. 757 с.
3. Справочник. Асинхронные двигатели серии 4А /А.Э. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская. М: Энергоиздат, 1982. 504 с.