

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	25
8 Расчёт рабочих и пусковых характеристик	29
9 Тепловой расчет и расчет вентиляции	44
Заключение	48
Список используемой литературы	49

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 $k_{об1} = 0,95$.

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).

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

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

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, $k_c=0,97$.

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = 8, \text{ мм};$$

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c} = 55, \text{ мм}.$$

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

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

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

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_n - b_{ш}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} = 10, \text{ мм};$$

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

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

$$S_{np} = 0,$$

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot h_n + b_1 + b_2) = 0,35 \cdot (2 \cdot 16 + 10 + 35) = 41,298, \text{ мм}^2.$$

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

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot u_n \cdot n_{эл}}{S_n'} = \frac{(0,49 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 144 \cdot 2}{399,796} = 0,556.$$

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

$$t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,201}{28} = 23, \text{ мм.}$$

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

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 0,928 \cdot 105 \cdot 8,55 = 807,326, \text{ А,}$$

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

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 42 \cdot 0,95}{28} = 8,55.$$

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 $J_2 = 3,3 \cdot 10^6$ А/м². Паз ротора принимаем $b_{ш} = 1,5$ мм, $h_{ш} = 0,7$ мм, $h'_{ш} = 0,3$ мм.

При $B_{z2} = 1,8$ Тл

$$b_{z2don} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{B_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_c} = 10, \text{ мм.}$$

Размеры паза

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

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - q_c \cdot 4}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{11,789 \cdot \left(\frac{28}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 244,6 \cdot 4}{\frac{28}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 8,073, \text{ мм};$$

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (12 - 8) \cdot \frac{28}{2 \cdot \pi} = 16,561, \text{ мм.}$$

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

$$h_{n2} = h'_{ш} + h_{ш} + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2} = 0,3 + 0,7 + \frac{12}{2} + 16,561 + \frac{8}{2} = 28, \text{ мм.}$$

Принимаем $h_{п2} = 28$. 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

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = 1000, \text{ мм}^2;$$

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = 3605, \text{ А},$$

где

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

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

Размеры замыкающих колец:

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

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

$$q_{кл} = b_{кл} \cdot a_{кл} = 1322 \text{ мм}^2;$$

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

5 Расчёт намагничивающего тока

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot k_{\delta} \cdot \delta = 1551, \text{ А},$$

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:

$$k_{\delta} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = 1,099,$$

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

При

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

Значения индукций в зубьях:

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot t_{cm1} \cdot k_c} = 1,6, \text{ Тл};$$

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot l_{\delta}}{b_{z2} \cdot t_{cm2} \cdot k_c} = 1,8, \text{ Тл};$$

t_1 и t_2 – ширина зубца ротора, м.

Индукция в ярме статора и ярме ротора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot t_{cm1} \cdot k_c} = 1,4, \text{ Тл};$$

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot t_{cm2} \cdot k_c} = 1,139, \text{ Тл};$$

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

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

Магнитные напряжения зубцовых зон статора и ротора

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 65,616, \text{ А};$$

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 82,688 \text{ А.}$$

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

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1,096$$

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

Магнитные напряжения ярм статора и ротора

$$F_a = L_a \cdot H_a = 211,44 \text{ А};$$

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

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} = 529 \text{ мм};$$

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 $B_j = 1,73 \text{ Тл}$.

$$F_j = L_j \cdot H_j = 238,701 \text{ А};$$

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:

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} = 185, \text{ мм};$$

h_j – высота ярма ротора:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = 28, \text{ мм.}$$

Магнитное напряжение на пару полюсов

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

$$F_{ц} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 2150 \text{ А.}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$k_{\mu} = \frac{F_{ц}}{F_{\delta}} = 1,386.$$

Намагничивающий ток

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{ц}}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = 19,957, \text{ А.}$$

Относительное значение

$$I_{\mu^*} = \frac{I_{\mu}}{I_{1н}} = 0,196.$$

6 Параметры рабочего режима

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 0,06 \text{ Ом.}$$

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная величина $\vartheta_1 = 115^\circ \text{C}$.

Для меди $\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{41} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Где L_1 – общая длина эффективных проводников фазы обмотки: $L_1 = l_{\text{сп1}} \cdot w_1 = 53,626 \text{ м}$.

При $l_{\text{сп1}} = 1,277 \text{ м}$; $l_{\text{пл}} = l_1 = 0,161 \text{ м}$; $K_L = 1,2$;

$$l_a = K_L \cdot b_{KT} + 2 \cdot B = 0,477 \text{ м.}$$

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

$$L_{\text{ббл}} = K_{\text{ббл}} \cdot b_{KT} + B = 0,109 \text{ м,}$$

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

$$b_{KT} = \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{пл}})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = 0,381 \text{ м.}$$

β_1 – укорочение шага обмотки ротора; $K_{\text{ббл}}$ – 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

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,028.$$

Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 5,9 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.}$$

При $k_r = 1$

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_2}{q_c} \cdot k_r = 3,129 \cdot 10^{-5} \text{ Ом};$$

$$r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = 6,947 \cdot 10^{-7} \text{ Ом},$$

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:

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} = 168 \text{ мм};$$

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

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{обл})^2}{Z_2} = 0,04 \text{ Ом.}$$

Относительное значение

$$r_{2*}' = r_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,019.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_\delta'}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{m1} + \lambda_{L1} + \lambda_{d1}) = 0,219 \text{ Ом},$$

где

$$\lambda_{m1} = \frac{h_3}{3 \cdot b} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_2}{b} + \frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_{III}} + \frac{h_{III}}{b_{III}} \right) \cdot k_\beta' = 1,78;$$

При $h_3 \approx h_{II.K} = 34,495 \text{ мм}$; $b = b_1 = 13 \text{ мм}$; $h_2 = 0$;

$$h_1 = 0,5 \cdot (b_1 - b_{III}) = 4,5 \text{ мм};$$

$$k_\beta = 1; k_\beta' = 1; l_\delta' = l_\delta = 0,161 \text{ м}.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{L1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_\delta'} \cdot (l_n - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 1,385,$$

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

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = 0,61;$$

$$\xi = 2 \cdot k'_{ск} \cdot k_\beta - k_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \cdot (1 + \beta_{ск}^2) = 0,543.$$

Для $\beta_{ск} = 0$ и $\frac{t_2}{t_1} = 1,271$, $k'_{ск} = 1$. Относительное значение

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,101.$$

Индуктивное сопротивление фазы ротора

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}) \cdot 10^{-6} = 370,985 \cdot 10^{-6}, \text{ Ом};$$

где

$$\lambda_{П2} = \left[\frac{h_1}{3 \cdot b} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b^2}{2 \cdot b} \right) + 0,66 - \frac{b_{ш}}{2 \cdot b} \right] \cdot k_{Д} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} + 1,12 \cdot \frac{h'_{ш} \cdot 10^6}{I_2} = 1,848$$

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

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния

$$\lambda_{Л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot l'_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{кл.ср}}{a_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} = 1,454,$$

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

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки, короткозамкнутого ротора

$$\lambda_{\text{д2}} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = 1,428;$$

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

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

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}} = 4,73.$$

Приводим x_2 к числу витков обмотки статора

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{\text{об1}})^2}{Z_2} = 0,206 \text{ Ом.}$$

Относительное значение

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

7 Расчёт потерь

Основные потери в стали

$$P_{ст.осн} = \rho_{1,0/5,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (k_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = 741,992, \text{ Вт},$$

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:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 71,637 \text{ кг};$$

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1cp} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 14,393 \text{ кг},$$

где h_a – высота ярма статора:

$$h_a = 0,5 \cdot (D_a - D) - h_{п1} = 0,055 \text{ мм};$$

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; $k_{да}$ и $k_{дз}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов: $k_{дз} = 1,8$, $k_{да} = 1,6$.

Поверхностные потери в роторе

$$P_{пов2} = p_{пов2} \cdot (t_2 - b_{ш2}) \cdot Z_2 \cdot l_{cm2} = 15,224 \text{ Вт};$$

При

$$P_{\text{пов}2} = 0,5 \cdot k_{o2} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_1)^2 = 320,791 \text{ Вт},$$

где $k_{o2} = 1,5$.

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0,195 \text{ Тл},$$

где для $\frac{b_{III}}{\delta} = \frac{1,5}{0,4} = 3,333$, $\beta_{02} = 0,24$.

Пульсационные потери в зубцах ротора

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

m_{z2} — масса стали зубцов ротора:

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{cm2} \cdot k_{c2} = 9,172 \text{ кг}.$$

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов для зубцов ротора

$$B_{\text{пуль}2} = \frac{\gamma \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{Z2} = 0,12 \text{ Тл};$$

B_{Z2} — средняя индукция в зубцах ротора, Тл; при $\gamma = 1,68$.

Сумма добавочных потерь в стали

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов}2} + P_{\text{пуль}2} = 184,683 \text{ Вт}.$$

Полные потери в стали

$$P_{CT} = P_{CT.OCN} + P_{CT.ДОБ} = 926,675 \text{ Вт.}$$

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

Механические потери

$$P_{МЕХ} = K_T \cdot \left(\frac{n_1}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 = 1 \cdot \left(\frac{3000}{10}\right)^2 \cdot 0,392^4 = 2125 \text{ Вт,}$$

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

Добавочные потери при номинальном режиме

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

где η – коэффициент полезного действия двигателя.

Холостой ход двигателя: Ток холостого хода двигателя

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

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

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{CT} + P_{МЕХ} + P_{\partial l.x.x}}{m \cdot U_{1Н}} = 4,732 \text{ А;}$$

Электрические потери в статоре при холостом ходе приближенно принимаются равными:

$$P_{\text{э1x.x}} \approx 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 71,422 \text{ Вт};$$

Реактивная составляющая тока холостого хода:

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

Коэффициент мощности при холостом ходе

$$\cos \varphi_{\text{x.x}} = \frac{I_{\text{x.x.a}}}{I_{\text{x.x}}} = 0,231.$$

8 Расчёт рабочих и пусковых характеристик

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

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

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

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

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

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1,02.$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

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

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:

$$a' = c_1^2 = 1,041, \text{ Ом};$$

$$b' = 0, \text{ Ом};$$

$$a = c_1 \cdot r_1' = 0,061, \text{ Ом};$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') = 0,437, \text{ Ом}.$$

Потери, не меняющиеся при изменении скольжения:

$$P_{cm} + P_{mex} = 3052 \text{ Вт}.$$

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: $P_{2н} = 55 \text{ кВт}$, $U_{1н} = 220 \text{ В}$, $I_{1н} = 101,75 \text{ А}$, $\cos \varphi_n = 0,91$, $\eta_n = 0,90$.

Таблица 1 – Результат расчета рабочих характеристик АД

Формула	Ед.изм	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

Продолжение таблицы 1

$I_2'' = U_{1H} / Z$	A	26,189 3	39,076 5	51,794 7	64,323 1	76,642 8	88,736 7	95,878 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
$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos \varphi_2'$	A	27,385 8	40,190 6	52,751 8	65,027 9	76,981 4	88,579 3	95,355 4
$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin \varphi_2'$	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
$P_1 = 3U_{1H}I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВ Т	18,074 7	26,525 8	34,816 2	42,918 4	50,807 7	58,462 3	62,934 6
$P_{\varphi 1} = 3I_1^2 r_1' \cdot 10^{-3}$	кВ Т	0,2168 1	0,3858 9	0,6159 8	0,9040 5	1,2467 3	1,6404 3	1,8995 7
$P_{\varphi 2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВ Т	0,0856 3	0,1906 4	0,3349 3	0,5165 5	0,7333 7	0,9830 8	1,1476 8
$P_{\text{дооб}} = P_{\text{дооб.н}} \cdot (I_1 / I_{1H})$	кВ Т	0,0355 5	0,0632 7	0,101	0,1482 3	0,2044 2	0,2689 7	0,3114 6
$\Sigma P = P_{cm} + P_{\text{мех}} + P_{\varphi 1} + P_{\varphi 2} + P_{\text{дооб}}$	кВ Т	3,3899 9	3,6918	4,1039 1	4,6208 3	5,2365 2	5,9444 8	6,4107 2
$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВ Т	14,684 7	22,834	30,712 3	38,297 6	45,571 2	52,517 9	56,523 9
$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	—	0,8124 5	0,8608 2	0,8821 3	0,8923 3	0,8969 3	0,8983 2	0,8981 4

Окончание таблицы 1

$\cos\varphi = I_{1a} / I -$	0,7890	0,8680	0,9017	0,9175	0,9249	0,9278	0,9282
	83	19	57	72	87	75	26

Построение рабочих характеристик приведено на рисунках 1–4.

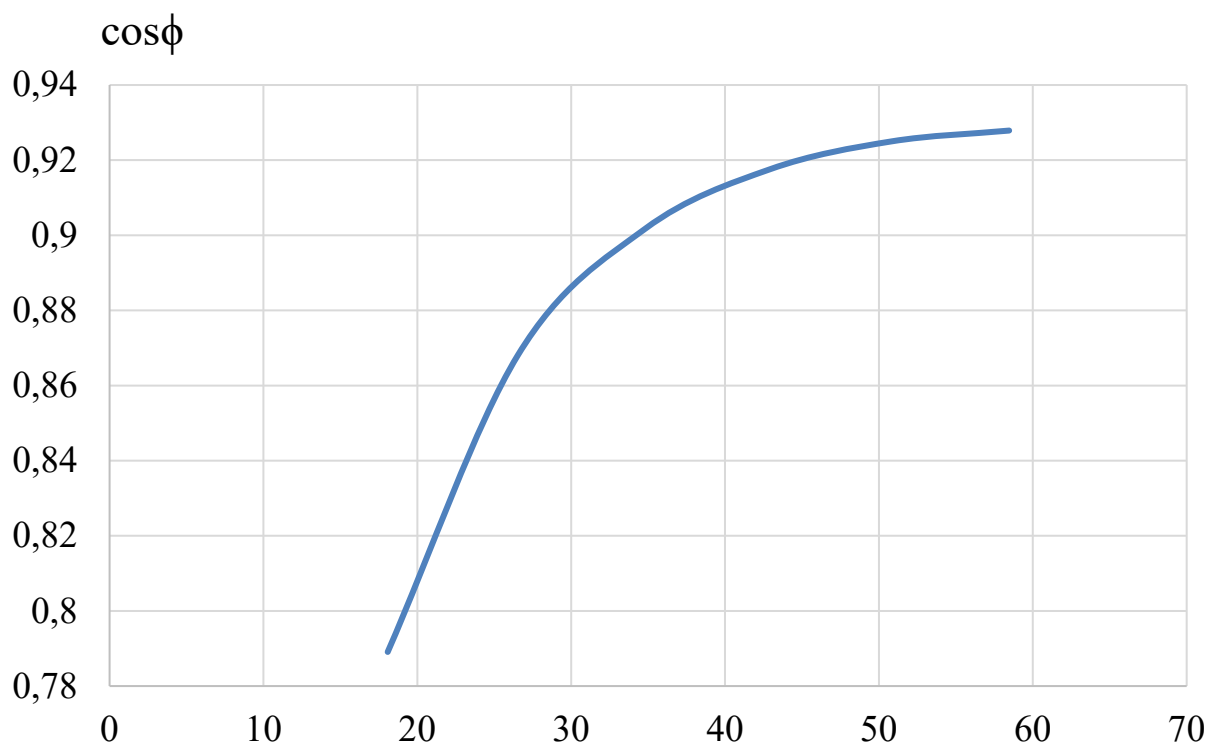


Рисунок 1 – Зависимость $\cos\varphi$ от P_1

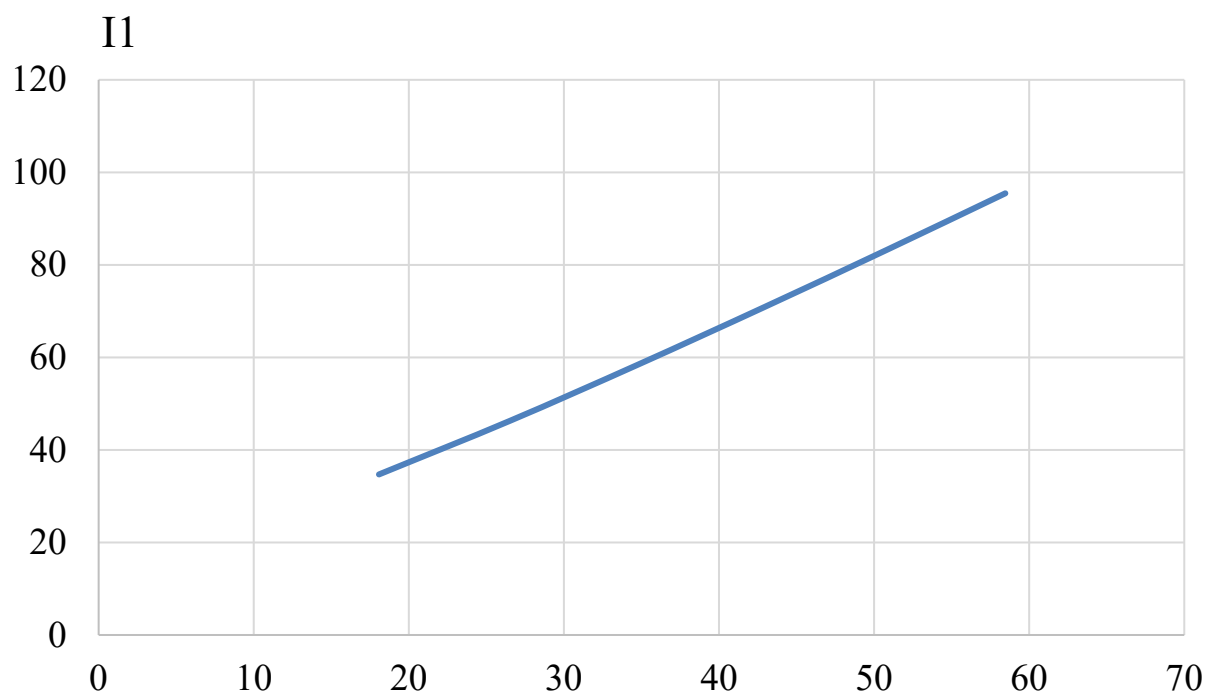


Рисунок 2 – Зависимость I_1 от P_1

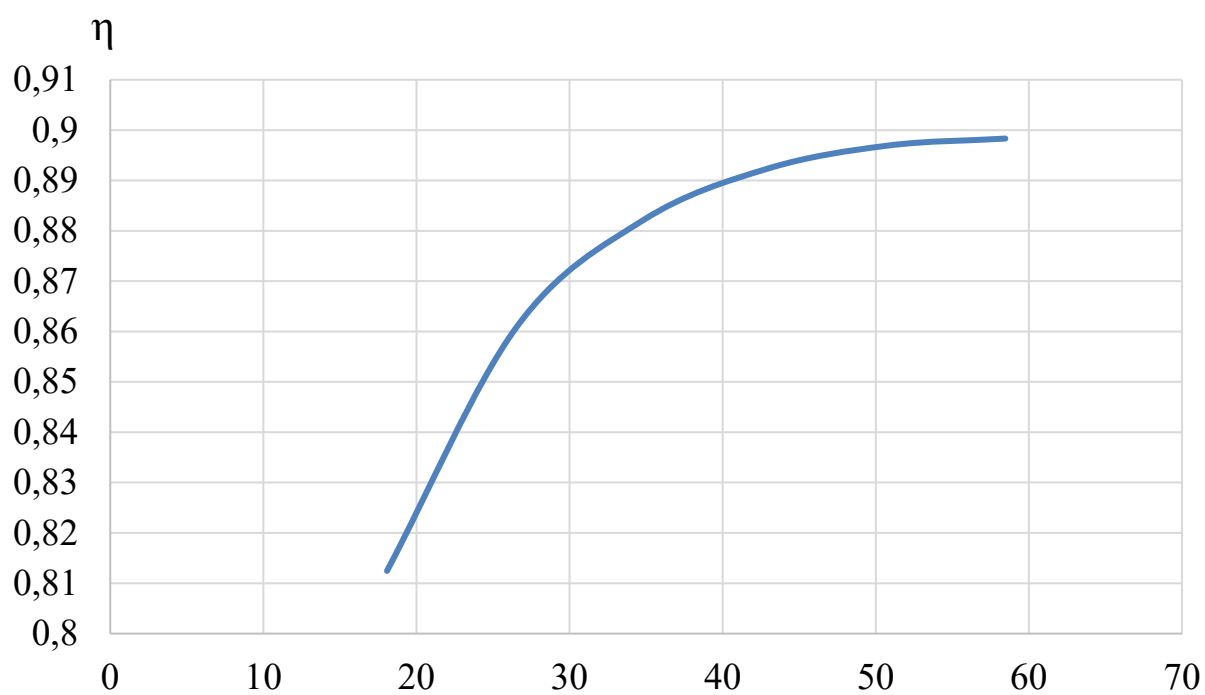


Рисунок 3 – Зависимость η от P_1

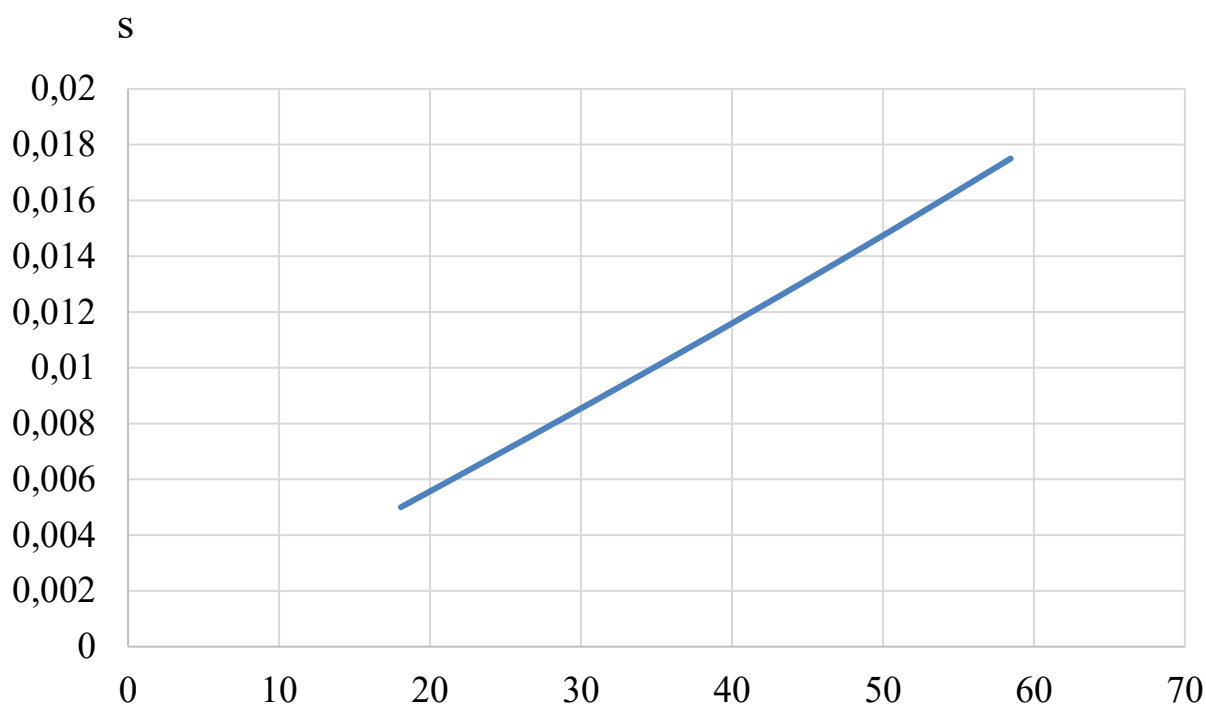


Рисунок 4 – Зависимость s от P₁

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.из м	Скольжение s					
		1	0,8	0,5	S _{кр} =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_D	—	0,75	0,82	0,9	0,95	0,95	0,98

Окончание таблицы 2

$K_X = \sum \lambda_{2\xi} / \sum \lambda_2$	—	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
$x'_{2\xi_{нас}} = \frac{x'_2 \sum \lambda_{2\xi_{нас}}}{\sum \lambda_2}$	ОМ	1,633	1,643	1,654	1,667	1,667	1,696
$x_{1нас} = \sum \lambda_{1нас} / \sum \lambda_1$	ОМ	0,631	0,633	0,638	0,642	0,642	0,672
$c_{1П.нас} = 1 + x_{1нас} / x_{12n}$	—	1,005	1,005	1,0051	1,0051	1,0051	1,005 3
$a_{II} = r_1 + c_{1П.нас} r'_{2\xi} / s$	ОМ	1,902	2,006	2,374	4,641	4,641	7,105
$b_{II} = \frac{x_{1нас} + c_{1П.нас} r'_{2\xi}}{s}$	ОМ	2,273	2,274	2,3	2,317	2,317	2,377
$I'_2 = \frac{U_{1H}}{\sqrt{a_{II}^2 + b_{II}^2}}$	А	128,21 7	125,3	114,95	73,257	73,257	50,72 1
$I_1 = \frac{I'_2 \sqrt{a_{II}^2 + (b_{II} + x_{12n})^2}}{c_{1н} x_{12n}}$	А	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.

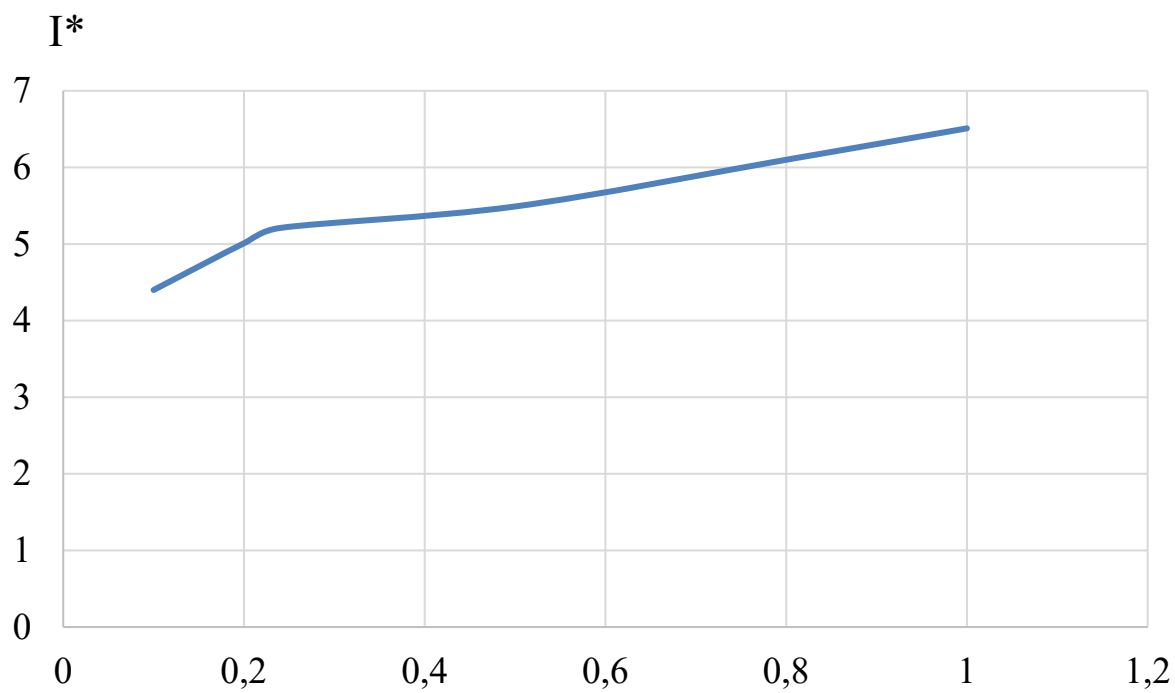


Рисунок 5 – Зависимость I^* от s

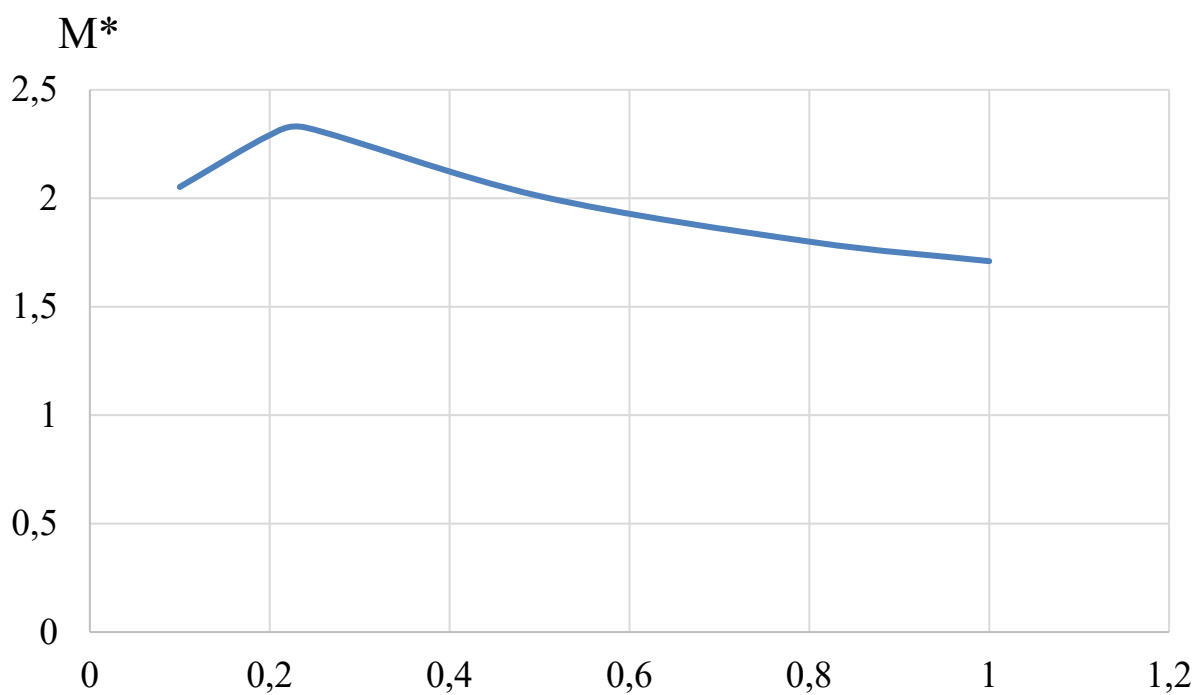


Рисунок 6 – Зависимость M^* от s

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

$$\xi = 63,61h_c\sqrt{s} = 1,756 ,$$

где h_c – высота стержня в пазу

$$h_c = h_n - (h_u + h'_u) = 21,5 , \text{ мм.}$$

Для $\xi = 1,756$ $\varphi = 0,55$, $\varphi' = k_d = 0,85$, 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

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = 18 , \text{ мм;}$$

$$qr = \frac{\pi b_2^2}{8} + \frac{b_2 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right) = 181,827 , \text{ мм}^2;$$

$$br = b_2 - \frac{b_2 - b_1}{h_1} \left(h_r - \frac{b_2}{2} \right) = 9,222 , \text{ мм.}$$

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

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = 1,042 .$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r'_2} (k_r - 1) = 1,028.$$

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

$$\lambda_{n2\xi} = \left[\frac{h_1}{3b} \left(1 - \frac{\pi b^2}{8q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_w}{2b} \right] k_\phi + \frac{b_w}{h_w} + 1,12 \frac{h'_w \cdot 10^6}{I_2} = 3,504.$$

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

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{\phi 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\phi 2}} = \frac{\sum \lambda_{2\xi}}{\sum \lambda_2} = 1,249;$$

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 0,257, \text{ Ом.}$$

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

$$I'_2 = \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_{2\xi})^2}} = 451,04, \text{ А.}$$

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 $k_{\text{нас}} I_1 = 1,35 \cdot 451,04 = 608,904 \text{ А}$. Для меньших $s k_{\text{нас}}$ снижают до 1,1.

Средняя МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора

$$F_{n.cp} = 0,7 \frac{k_{\text{нас}} I_1 u_n}{a} \left(k'_{\beta} + k_y k_{\text{об1}} \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 6628, \text{ А},$$

где I_1 – ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения; a – число параллельных ветвей обмотки статора; $u_{\text{п1}}$ – 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

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{n.cp}}{1,6\delta C_N} \cdot 10^{-6} = 3,023, \text{ Тл},$$

где коэффициент

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 1,142$$

при $B_{\phi\delta} = 3,023 \text{ Тл}$; $\kappa_{\delta} = 0,75$.

Значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора

$$c_1 = (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - \kappa_{\delta}) = 3,447, \text{ мм}.$$

Для полужакрытого паза высота клиновой части паза

$$h' = 0,5 \cdot (b_2 - b_{ш}) = 2, \text{ мм};$$

$$\Delta \lambda_{n1нас} = \frac{h_{ш1} + 0,58h'}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_1}{c_1 + b_{ш1}} = 0,25.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta \lambda_{n1нас} = 1,53,$$

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

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

$$\lambda_{o1нас} = \lambda_{o1} \kappa_{\delta} = 0,458.$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} = 0,203, \text{ Ом};$$

$$\sum \lambda_{1нас} = \lambda_{n1нас} + \lambda_{o1нас} + \lambda_{л1} = 5,426.$$

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

$$\Delta\lambda_{n2нас} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_2}{c_2 + b_{u2}} = 0,297,$$

где c_2 – дополнительное раскрытие:

$$c_2 = (t_2 - b_{u2}) \cdot (1 - \kappa_\delta) = 2,625, \text{ мм.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для ротора

$$\lambda_{n2нас} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2нас} = 2,73.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения

$$\lambda_{o2нас} = \lambda_{o2} \kappa_\delta = 1,071.$$

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

$$x'_{2\xiнас} = x'_{2'} \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xiнас}}{\sum \lambda_2} = 0,229, \text{ Ом};$$

$$\sum \lambda_{2\xiнас} = \lambda_{2\xiнас} + \lambda_{o2нас} + \lambda_{л2} = 5,255.$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток в пусковом режиме

$$x_{12n} = x_{12} \cdot \frac{F_u}{F_\delta} = 14,973, \text{ Ом.}$$

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

$$c_{1nnc} = 1 + \frac{x_{1nac}}{x_{12n}} = 1,014 ;$$

$$a_n = r_1 + c_{1nnc} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 0,109 , \text{ Ом};$$

$$b_n = c_{1nnc} \cdot x'_{2\xi nac} + x_{1nac} = 0,435 , \text{ Ом}.$$

Ток в обмотке ротора

$$I'_2 = \frac{U_{1n}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} = 490,439 , \text{ А};$$

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{a_n^2 + (b_n + x_{12n})^2}}{c_{1nnc} x_{12n}} = 497,94 , \text{ А}.$$

Характеризующие пусковые данные машины кратность тока и момента при заданном s

$$I_{n*} = \frac{I_{1n}}{I_{1H}} = 4,894 ;$$

$$M_{n*} = \left(\frac{I'_{2n}}{I'_{2H}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_H}{s_n} = 2,026 .$$

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 $s = 0,5 - 0,2$:

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

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:

$$\Delta \vartheta_{нов1} = K \cdot \frac{P'_{\text{э.н1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 15,725, \text{ } ^\circ\text{C},$$

где коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду $K=0,22$. Потери в пазовой части $P'_{\text{э.н1}}$:

$$P'_{\text{э.н1}} = k_p \cdot P_{\text{э1}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} = 514,041, \text{ Вт},$$

где из таблицы 1 для s_n находим $P_{\text{э1}}=1900$ Вт, коэффициент теплоотдачи с поверхности $\alpha_1=170$ Вт/(м²·°C); коэффициент увеличения потерь $k_p=1,07$.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta \vartheta_{\text{из.н1}} = \frac{P'_{\text{э.н1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_1} \left(\frac{b_{\text{из.н1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 3,361 \text{ } ^\circ\text{C},$$

где расчетный периметр поперечного сечения паза статора:

$$\Pi_{\text{н1}} = 100 \text{ мм}.$$

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

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta \vartheta_{из.л1} = \frac{P'_{э.л1}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{л1} \cdot l_1} \left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{экг}} + \frac{h_{л1}}{12 \cdot \lambda'_{экг}} \right) = 1,291^\circ\text{C},$$

где потери в лобовых частях катушек $P'_{э.л1}$:

$$P'_{э.л1} = k_p \cdot P_{э1} \cdot \frac{2 \cdot l_{л1}}{l_{cp}} = 1519, \text{ Вт.}$$

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

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

$$\Delta \vartheta_{нов.л1} = \frac{K \cdot P'_{э.л1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{выл} \cdot \alpha_1} = 4,765, ^\circ\text{C}.$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta \vartheta'_1 = \frac{(\Delta \vartheta_{нов1} + \Delta \vartheta_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}} + \frac{(\Delta \vartheta_{нов.л1} + \Delta \vartheta_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_1}{l_{cp1}} = 9,35^\circ\text{C}.$$

Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды:

$$\Delta \vartheta_г = \frac{\sum P'_г}{S_{кор} \cdot \alpha_г} = 77,021, ^\circ\text{C},$$

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

$$\sum P'_e = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{э.н1} + P_{ст.осн}) - 0,9 \cdot P_{мех} = 3732, \text{ Вт}$$

$$\sum P' = \sum P + (k_p - 1)(P_{э1} + P_{э2}) = 6624, \text{ Вт.}$$

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса:

$$S_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{выл.л1}) = 1,864, \text{ м}^2.$$

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

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta \vartheta_1 = \Delta \vartheta'_1 + \Delta \vartheta_e = 86,371, ^\circ\text{С}.$$

Значение находится в допустимых пределах.

Расчет вентиляции, требуемой для охлаждения расход воздуха:

$$Q_e = \frac{k_m \cdot \sum P'_e}{1100 \cdot \Delta \vartheta_e} = 0,453, \text{ м}^3/\text{с},$$

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:

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

Расход воздуха $Q'_в$ должен быть больше требуемого для охлаждения машины $Q_в$:

$$Q'_e > Q_e.$$

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: $M^*_n = 2,026$; $I^*_n = 4,894$; $s_n = 0,019$; $s_{кр} = 0,244$; $\Delta Q_1 = 86,371$. Постоянная Арнольда C_A получилась как у базового двигателя:

$$C_A = \frac{2}{\pi B_\delta A k_{об1} k_B \alpha_\delta} = \frac{l_\delta D^2 \omega}{P'} = \frac{0,161 \cdot 0,204 \cdot 42}{2632} = 4,28 \cdot 10^{-5}, \text{ м}^3/(\text{с} \cdot \text{Вт}).$$

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.