

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования

«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Кафедра микропроцессорных средств автоматизации

## **КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

по дисциплине: Электрические машины

Тема: Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором

Выполнил: студент гр. ЭЭ-19-46

Марков А.В.

Проверил: доцент каф. МСА

Даденков Д.А.

Пермь 2022 г.

# Исходные данные

Исходные данные задания к курсовому проекту представлены в табл.1.

Дополнительно определен способ охлаждения – IC 0141; климатическое исполнение и категория размещения – У3; класс нагревостойкости изоляции – F; режим работы – длительный, серия двигателя – 4А.

Таблица 1- Исходные данные

| № п/п | Тип двигателя | Номинальная мощность, кВт | Синхронная скорость, об/мин | Кратность моментов $M_{кр}/M_n$ | Линейное напряжение, В |
|-------|---------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| 12    | АДКЗР         | 45                        | 750                         | 2,4                             | 660                    |

# 1. Выбор главных размеров

Число пар полюсов:  $p = \frac{60f_1}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750} = 4$  тогда  $2p=8$

Высота оси вращения:  $h = 250$  мм

Наружный диаметр статора:  $D_a = 0,437$  м

Внутренний диаметр статора:  $D = k_d \cdot D_a = 0,3059$  м

Полюсное деление:  $\tau = \frac{\pi D}{2p} = 0,1270$  м

Предварительные значения  $\eta$  и  $\cos \phi$ :  $\eta=91\%$ ,  $\cos \phi=0,85$ .

Электромагнитные нагрузки (предварительно):  $A = 40 \cdot 10^3$  А/м,  $B_\delta=0,865$  Тл.

Расчетная длина магнитопровода :  $l_\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{об1п} \cdot A \cdot B_\delta} = 0,1950$  м

Проверка правильности выбора главных размеров:  $\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = 1,535$

находится в допустимых пределах  $1,3 < \lambda < 2,1$

## 2. Расчет параметров статора

Число пазов статора:  $Z_1=96$  число пазов на полюс и фазу:  $q_1 = \frac{Z_1}{(2pm)} = 4$

Зубцовое деление статора:  $t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{Z_1} = 0,01058 \text{ м}$

Номинальный ток обмотки статора:  $I_{1\text{ном}} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1\text{ном}} \cdot \eta \cdot \cos\phi} = 51.03 \text{ А}$

Число эффективных проводников в пазу (предварительно):  $u'_\pi = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1\text{ном}} \cdot Z_1} = 8,28 \text{ В}$

Число витков в фазе:  $W_1 = \frac{u_\pi \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 128$  При  $a = 1$ :  $u_\pi = a \cdot u'_\pi = 8$

Линейная нагрузка:  $A = \frac{2 \cdot I_{1\text{ном}} \cdot W_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = 38578,52 \text{ А/м}$

Магнитный поток:  $\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1\text{ном}}}{4k_B \cdot W_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot f} = 0.0139 \text{ Вб}$

Индукция в воздушном зазоре:  $B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = 0,8822 \text{ Тл}$

Плотность тока в обмотке статора (предварительно):  $J = \frac{(AJ_1)}{A} = 6,66 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$

## 2. Расчет параметров статора (продолжение)

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно):  $q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{a \cdot J_1} = 8,04 \text{ мм}^2$

Сечение эффективного проводника, принимаем  $n_{\text{эл}} = 4$ :  $q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = 1,985 \text{ мм}^2$

Принимаем обмоточный провод марки ПЭТ-155:

Окончательно:  $q_{\text{эл}} = 1,985 \text{ мм}^2$ ;  $d_{\text{из}} = 1,6 \text{ мм}$

Плотность тока в обмотке статора (окончательно):  $J_1 = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = 6,34 \cdot 10^6 \text{ А/мм}^2$

Ширина зубца статора:  $b_{z1} = 5,23 \text{ мм}$

Размеры паза в штампе:  $h_{\text{п}} = 28,5 \text{ мм}$ ;  $b_1 = 5,5 \text{ мм}$ ;  $b_2 = 7,2 \text{ мм}$ ;  $h_{\text{п.к}} = 26,4 \text{ мм}$ ;  $b_{\text{ш}} = 3,7 \text{ мм}$ ;  $h_{\text{ш}} = 1 \text{ мм}$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки:

$$S'_{\text{п}} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{\text{п.к}} - (S_{\text{из}} + S_{\text{пр}}) = 119,94 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу:  $S_{\text{из}} = 34,85 \text{ мм}^2$

Коэффициент заполнения паза:  $k_3 = \frac{d_{\text{из}}^2 \cdot u_{\text{п}} \cdot n_{\text{эл}}}{S'_{\text{п}}} = 0,7201$  входит в  $0,72 < k_3 < 0,74$

Выбор воздушного зазора:  $\delta = 0,7 \text{ мм}$

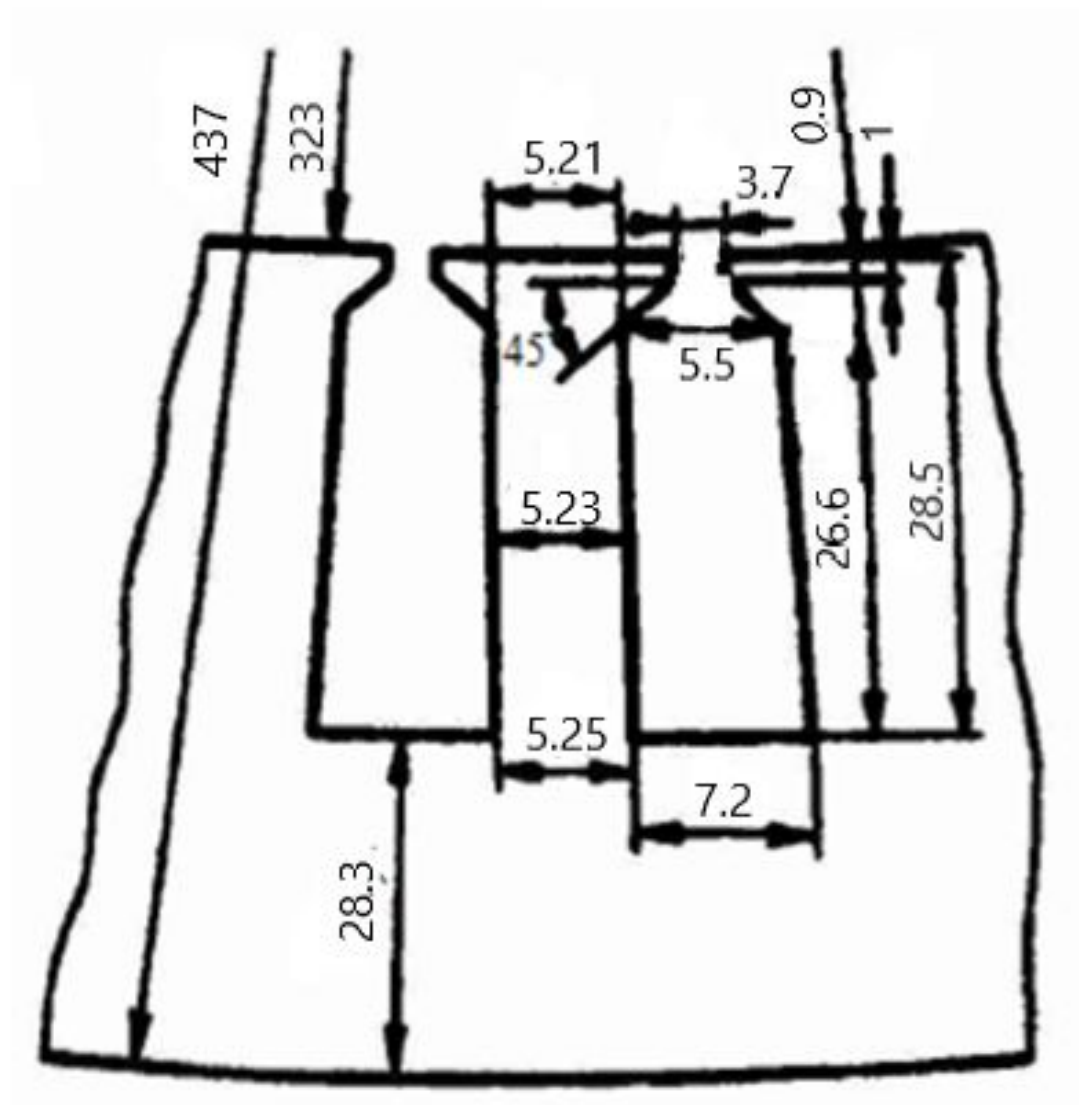


Рис. 1. - Паз и зубец статора проектируемого двигателя

### 3. Расчет параметров ротора

Выбор числа пазов:  $Z_2 = 110$

Внешний диаметр ротора:  $D_2 = D - 2 \cdot \delta = 322,0 \text{ мм}$

Длина магнитопровода:  $l_2 = l_1 = 0,195 \text{ м}$

Зубцовое деление ротора:  $t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = 9,2 \text{ мм}$

Внутренний диаметр ротора:  $D_B = k_B \cdot D_a = 0,1005 \text{ м}$

Ток в обмотке ротора:  $I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 290,04 \text{ А}$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительно):  $q_{\text{п}} = \frac{I_2}{J_2} = 85,31 \text{ мм}^2$



### 3. Расчет параметров ротора (продолжение)

Размеры паза ротора:  $b_{ш} = 1,5 \text{ мм}$ ;  $h_{ш} = 0,7 \text{ мм}$ ;  $h'_{ш} = 0,3 \text{ мм}$ ;  $b_{z2} = 4,2 \text{ мм}$ ;  
 $b_1 = 4,8 \text{ мм}$ ;  $b_2 = 3,9 \text{ мм}$ ;  $h_1 = 15,8 \text{ мм}$ ;  $h_{п2} = 21,8 \text{ мм}$

Площадь поперечного сечения стержня (окончательно):

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + 0.5(b_1 + b_2)h_1 = 83,751 \text{ мм}^2$$

Плотность тока в стержне (окончательно):  $J_2 = \frac{I_2}{q_c} = 3,46 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$

Ток в кольце:  $I_{кл} = \frac{I_2}{2 \cdot \sin \frac{\pi p}{z_2}} = 1272,19 \text{ А}$ .

Сечение короткозамкнутого кольца:  $q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = 432,18 \text{ мм}^2$ ;

Размеры короткозамкнутого кольца:

Высота короткозамкнутого кольца -  $h_{кл} = 1,25 \cdot h_{п2} = 26,5 \text{ мм}$ ;

Длина короткозамкнутого кольца -  $b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{1074,577}{38,5} = 16,3 \text{ мм}$ ;

Средний диаметр короткозамкнутого кольца -  $D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} = 295,5 \text{ мм}$



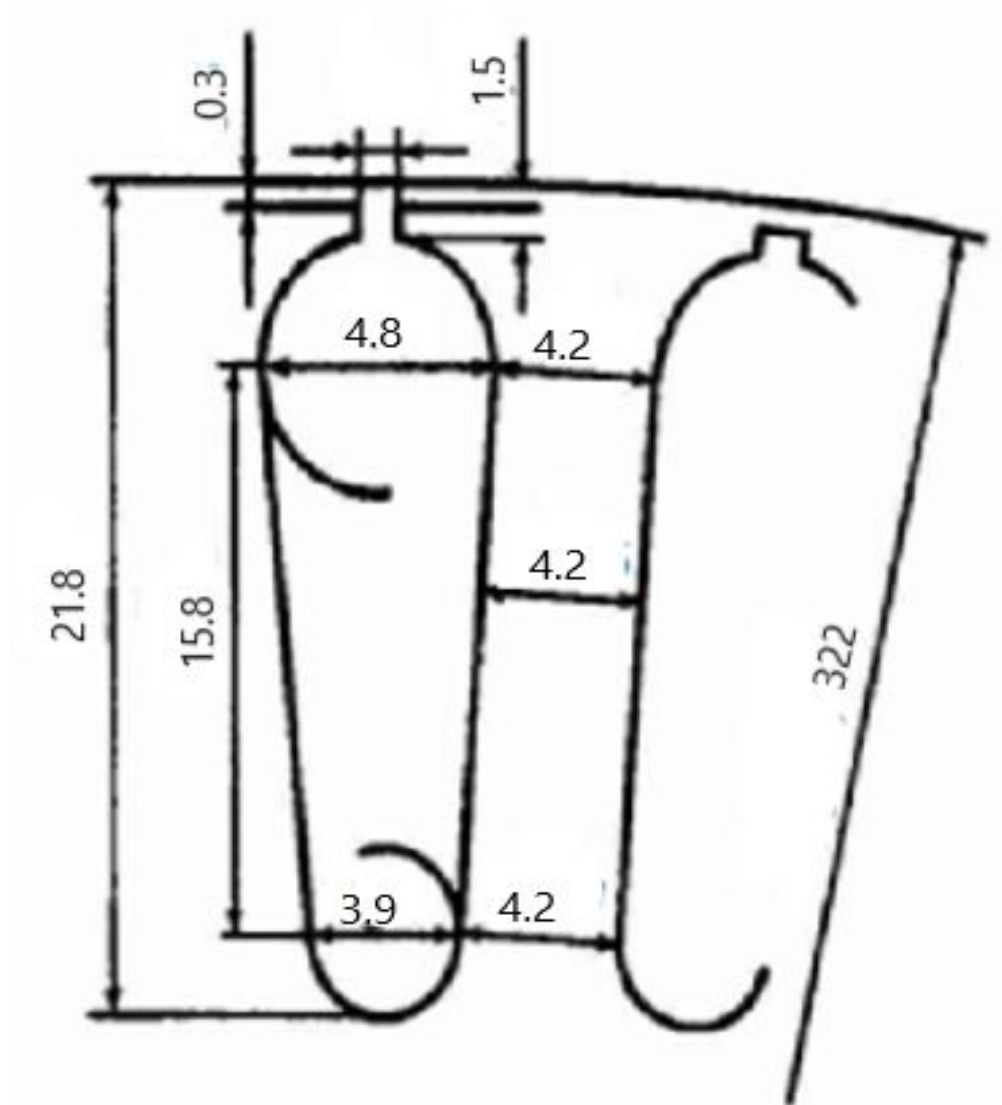


Рис. 2. - Паз ротора проектируемого двигателя

## 4. Расчет магнитной цепи

Магнитопровод из электротехнической стали 2013

Магнитное напряжение воздушного зазора:  $F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 733,1057 \text{ A}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:  $F_{Z1} = 2h_{Z1} \cdot H_{Z1} = 604,2 \text{ A}$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:  $F_{Z2} = 2h_{Z2} H_{Z2} = 5,16 \text{ A}$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны:  $k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} = 1,51$

$1,2 < k_Z < 1,6$  - в допустимых пределах.

Магнитное напряжение ярма статора:  $F_a = L_a H_a = 18,35 \text{ A}$

Магнитное напряжение ярма ротора:  $F_j = L_j H_j = 3,88 \text{ A}$

Магнитное напряжение цепи на два полюса:  $F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 1819,66 \text{ A}$

Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя:  $k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = 1,5$

$1,3 < k_{\mu} < 1,5$  - в допустимых пределах.

Намагничивающий ток:  $I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\Sigma}}{0,9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o61}} = 22,7 \text{ A}$

Относительное значение намагничивающего тока:  $I_{\mu^*} = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}} = 0,44$

$0,4 < I_{\mu^*} < 0,45$  в допустимых пределах.

## 5. Расчет параметров рабочего режима

Активное сопротивление обмотки статора:  $r_1 = k_R \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\text{эф}} a} = 0,301 \text{ Ом}$

Относительное значение:  $r_{1*} = r_1 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,04$

Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Приводим  $r_2$  к числу витков обмотки статора:  $r'_2 = r_2 \frac{4m_1 (W_1 k_{\text{об1}})^2}{Z_2 k_{\text{СК}}^2} = 0,230 \text{ Ом}$

Относительное значение:  $r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,031$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}) = 0,675 \text{ Ом} \quad x_1^* = x_1 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,091$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_\delta (\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}}) = 0,00036 \text{ Ом}$$

Приведённое к числу витков статора индуктивное сопротивление фазы

обмотки ротора :  $x'_{2} = x_2 \frac{4m(w_1 k_{\text{об1}})^2}{Z_2 k_{\text{СК}}^2} = 0,561 \text{ Ом} \quad x'_{2*} = x'_2 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,10002$

## 6. Расчёт потерь

Основные потери в стали статора:  $P_{\text{ст.осн}} = p_{\frac{1.0}{50}} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_{Z1}^2 m_{Z1}) = 677,7 \text{ Вт}$

Поверхностные потери в роторе:  $P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} (t_{Z2} - b_{\text{ш2}}) Z_2 l_{\text{ст2}} = 21,5 \text{ Вт}$

Пульсирующие потери:  $P_{\text{пул2}} = 0,11 \left( \frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пул2}} \right)^2 m_{Z2} = 342,8 \text{ Вт}$

Сумма добавочных потерь в стали:  $P_{\text{пов1}}$  и  $P_{\text{пул1}} \approx 0$

$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пул1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} = 364,3 \text{ Вт}$

Полные потери в стали:  $P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 1042,0 \text{ Вт}$

Механические потери:  $P_{\text{мех}} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 133,2 \text{ Вт}$

Расчет параметров холостого хода:

$$P_{\text{э1х.х}} = m \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 = 468 \text{ Вт}; \quad \cos \phi_{\text{х.х}} = \frac{I_{\text{х.х.а}}}{I_{\text{х.х}}} = 0,063 \quad I_{\text{х.х}} = \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_\mu^2} = 22,81 \text{ А}$$

## 7. Расчёт рабочих характеристик

Активное сопротивление, характеризующее магнитные

потери в схеме замещения:  $r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = 0,43 \text{ Ом}$

Сопротивление взаимной индуктивности:  $x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} - x_1 = 16,004 \text{ Ом}$

Модуль комплексного коэффициента:  $c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1,043$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3U_{1\text{ном}}} = 1,01 \text{ А}$$

$$a' = c_1^2 = 1,088$$

$$a = c_1 r_1 = 0,321$$

$$b = c_1 (x_1 + c_1 x_2') = 0,775$$



Таблица 2 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

| № | Расчётная формула                                      | Скольжение S |       |       |       |       | S <sub>НОМ</sub> |       |
|---|--|--------------|-------|-------|-------|-------|------------------|-------|
|   |  | 0,005        | 0,01  | 0,015 | 0,02  | 0,03  |                  |       |
| 1 | $a'r_2'/s, \text{ Ом}$                                 | 50,00        | 25,00 | 16,67 | 12,50 | 10,00 | 8,33             | 11,36 |
| 2 | $R = a + \frac{a'r_2'}{s}, \text{ Ом}$                 | 50,35        | 25,35 | 17,02 | 12,85 | 10,35 | 8,68             | 11,71 |
| 3 | $X = b + \frac{b'r_2'}{s}, \text{ Ом}$                 | 1,31         | 1,31  | 1,31  | 1,31  | 1,31  | 1,31             | 1,31  |
| 4 | $Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \text{ Ом}$                     | 50,37        | 25,38 | 17,07 | 12,92 | 10,43 | 8,78             | 11,79 |
| 5 | $I_2'' = \frac{U_{1н}}{Z}, \text{ А}$                  | 7,54         | 14,97 | 22,26 | 29,42 | 36,42 | 43,27            | 32,24 |
| 6 | $\cos\phi_2' = \frac{R}{Z}$                            | 1,00         | 1,00  | 1,00  | 0,99  | 0,99  | 0,99             | 0,99  |
| 7 | $\sin\phi_2' = \frac{X}{Z}$                            | 0,03         | 0,05  | 0,08  | 0,10  | 0,13  | 0,15             | 0,11  |
| 8 | $I_{1а} = I_{0а} + I_2'' \cdot \cos\phi_2', \text{ А}$ | 8,98         | 16,39 | 23,64 | 30,71 | 37,57 | 44,23            | 33,48 |
| 9 | $I_{1р} = I_{0р} + I_2'' \cdot \sin\phi_2', \text{ А}$ | 22,96        | 23,53 | 24,47 | 25,74 | 27,33 | 29,21            | 26,34 |



|    |  |       |       |       |       |       |       |       |
|----|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 10 | $I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}, \text{ A}$  | 24,65 | 28,68 | 34,02 | 40,07 | 46,46 | 53,00 | 42,60 |
| 11 | $I_2' = c_1 \cdot I_2'', \text{ A}$  | 7,87  | 15,61 | 23,22 | 30,68 | 37,99 | 45,13 | 33,62 |
| 12 | $P_1 = 3U_{\text{ном}} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3},$<br>кВт   | 10,24 | 18,68 | 26,95 | 35,01 | 42,84 | 50,42 | 38,17 |
| 13 | $P_{\text{эл}} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$  | 0,55  | 0,74  | 1,05  | 1,45  | 1,95  | 2,54  | 1,64  |
| 14 | $P_{\text{эл}} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3},$<br>кВт   | 0,04  | 0,17  | 0,37  | 0,65  | 1,00  | 1,41  | 0,78  |
| 15 | $P_{\text{доп}} = 0,005 P_1, \text{ кВт}$  | 0,05  | 0,09  | 0,13  | 0,18  | 0,21  | 0,25  | 0,19  |
| 16 | $\sum P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} +$<br>$+ P_{\text{эл}} + P_{\text{эл}} + P_{\text{доп}}, \text{ кВт}$ | 1,82  | 2,18  | 2,73  | 3,45  | 4,33  | 5,37  | 3,78  |
| 17 | $P_2 = P_1 - \sum P, \text{ кВт}$  | 8,42  | 16,50 | 24,22 | 31,56 | 38,50 | 45,05 | 34,38 |
| 18 | $\eta = 1 - \sum \frac{P}{P_1}$  | 0,82  | 0,88  | 0,90  | 0,90  | 0,90  | 0,89  | 0,90  |
| 19 | $\cos \phi = \frac{I_{1a}}{I_1}$   | 0,36  | 0,57  | 0,69  | 0,77  | 0,81  | 0,83  | 0,79  |

# 7. Расчет рабочих характеристик (графики)

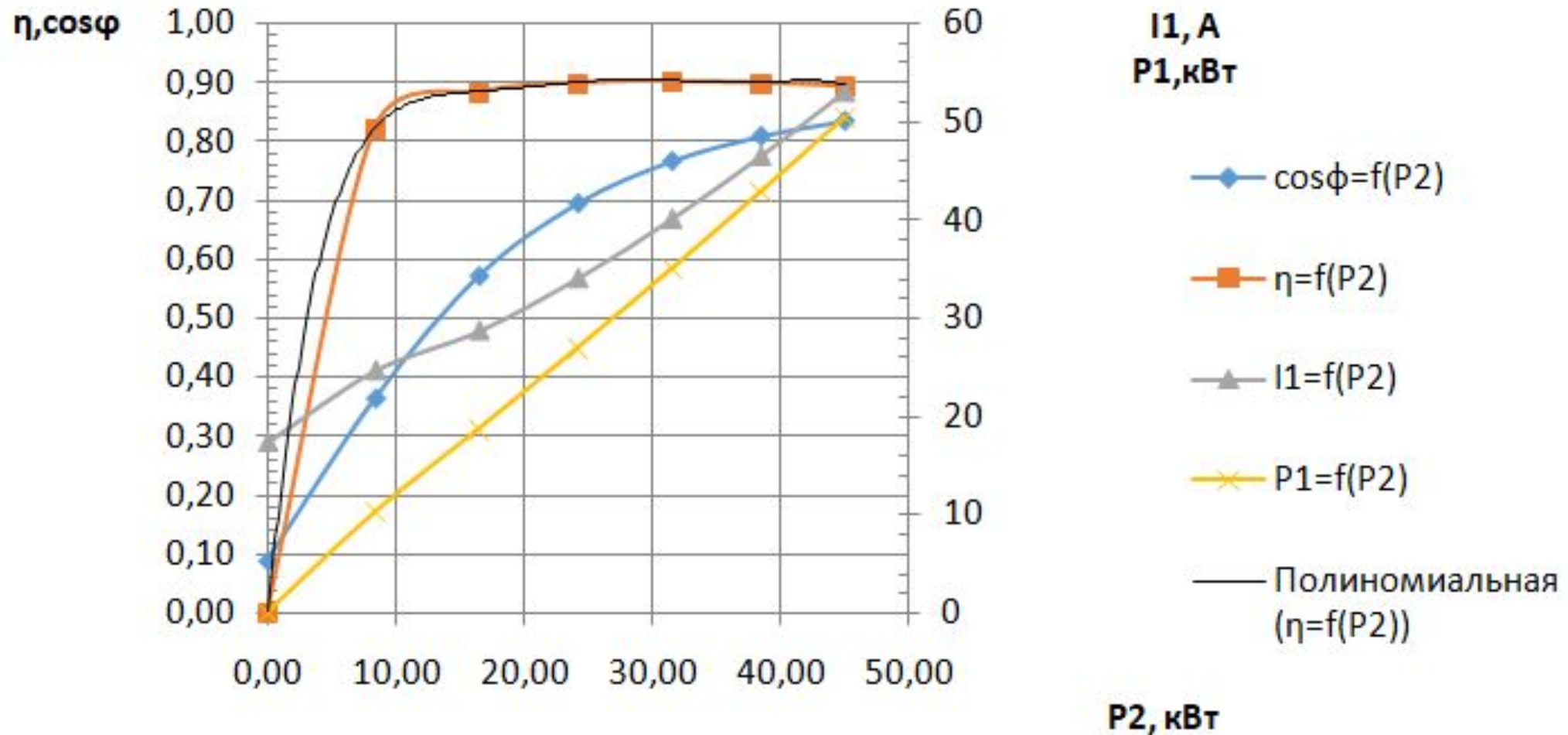


Рис. 3. Рабочие характеристики проектируемого двигателя с короткозамкнутым ротором

## 7. Расчет рабочих характеристик (графики)

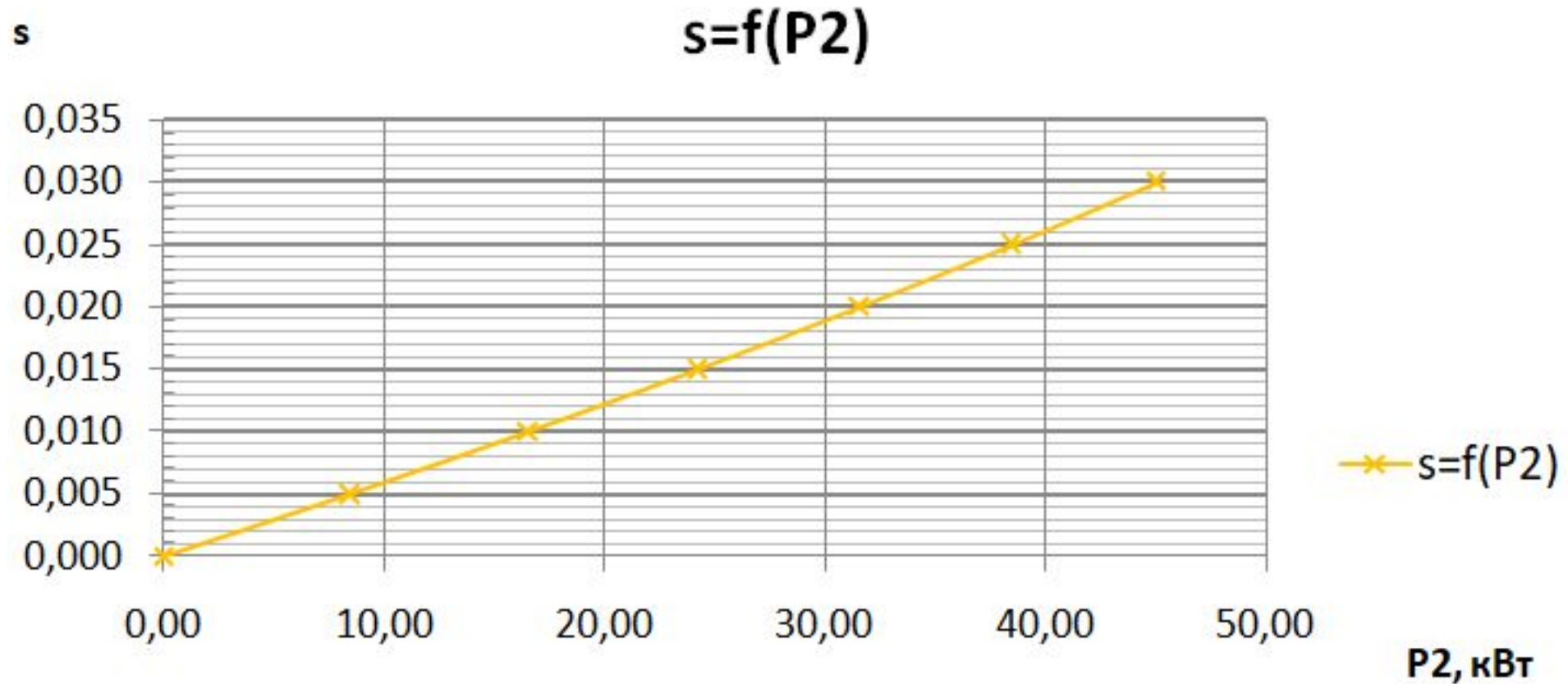


Рис. 4. Рабочие характеристики  $s=f(P_2)$  проектируемого двигателя с короткозамкнутым ротором

# 8. Расчёт пусковых характеристик

Таблица 3 – Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта

| №   | Расчетная формула  | Размерность     | Скольжение |       |       |       |       | $s_{\text{сп}}$ |
|-----|--|-----------------|------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
|     |  |                 | 1          | 0,8   | 0,5   | 0,2   | 0,1   |                 |
| 1   | $\xi = 63,61h_c\sqrt{s}$   | -               | 1,28       | 1,15  | 0,91  | 0,57  | 0,41  | 0,83            |
| 2   | $\phi(\xi)$  | -               | 0,750      | 0,500 | 0,220 | 0,096 | 0,024 | 0,100           |
| 3   | $h_r = \frac{h_c}{1+\varphi}$  | мм              | 11,51      | 13,43 | 16,52 | 18,38 | 19,68 | 18,32           |
| 4.1 | $b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right)$                     | мм              | 6,03       | 6,14  | 6,33  | 6,44  | 6,52  | 6,44            |
| 4.2 | $q_r = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right)$ | мм <sup>2</sup> | 30,76      | 31,62 | 33,03 | 33,90 | 34,51 | 33,87           |
| 4.3 | $k_r = \frac{q_c}{q_r}$  | -               | 2,72       | 2,65  | 2,54  | 2,47  | 2,43  | 2,47            |
| 5   | $K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1)$  | -               | 2,31       | 2,25  | 2,17  | 2,12  | 2,08  | 2,12            |
| 6   | $r'_{2\xi} = K_R \cdot r_2'$   | Ом              | 0,53       | 0,52  | 0,50  | 0,49  | 0,48  | 0,49            |

Окончание табл. 3

| №  | Расчетная формула  | Размерность | Скольжение |            |            |        |       | $s_{кр}$   |
|----|--|-------------|------------|------------|------------|--------|-------|------------|
|    |  |             | 1          | 0,8        | 0,5        | 0,2    | 0,1   |            |
| 7  | $k_D = \varphi'(\xi)$  | -           | 0,77       | 0,83       | 0,92       | 0,96   | 0,98  | 0,99       |
| 8  | $\lambda_{П2\xi} = \lambda_{П2} - \Delta\lambda_{П2\xi}$   | -           | 2,38       | 2,56       | 2,84       | 2,96   | 3,03  | 3,06       |
| 9  | $K_X = \frac{\lambda_{П2\xi} + \lambda_{П2} + \lambda_{Д2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{П2} + \lambda_{Д2}}$ | -           | 0,851      | 0,890      | 0,948      | 0,974  | 0,987 | 0,994      |
| 10 | $x_{2\xi}' = K_X \cdot x_{2}'$   | Ом          | 0,476      | 0,498      | 0,531      | 0,545  | 0,553 | 0,556      |
| 11 | $R_{П} = r_1 + c_{1П} \frac{r_{2\xi}'}{s}$   | Ом          | 0,862      | 0,984      | 1,348      | 2,848  | 5,308 | 1,524      |
| 12 | $X_{П} = x_1 + c_{1П} \cdot x_{2\xi}'$   | Ом          | 1,18       | 1,20       | 1,24       | 1,25   | 1,26  | 1,27       |
| 13 | $I_{2П} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{П}^2 + X_{П}^2}}$  | А           | 259,7<br>7 | 244,3<br>4 | 207,5<br>9 | 122,12 | 69,65 | 191,8<br>3 |
| 14 | $I_{1П} = \frac{I_{2'} \sqrt{R_{П}^2 + (X_{П} + x_{12П})^2}}{e_{1П} \cdot x_{12П}}$                      | А           | 261,4<br>1 | 246,1<br>5 | 209,5<br>5 | 123,94 | 71,79 | 193,9<br>1 |



# 8. Расчёт пусковых характеристик(продолжение)

Таблица 4 – Расчет токов в пусковом режиме асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

| №    | Расчетная формула  | Размерно<br>сть | Скольжение |         |         |         |        | S <sub>кп</sub> |
|------|--|-----------------|------------|---------|---------|---------|--------|-----------------|
|      |  |                 | 1          | 0,8     | 0,5     | 0,2     | 0,1    |                 |
| 1    | $k_{нас}$  | -               | 1,35       | 1,3     | 1,2     | 1,1     | 1,05   | 1,08            |
| 2    | $F_{н.сп} = 0,7 \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot u_n}{a} \left( k'_{\beta} + k_{y1} \cdot k_{ос1} \frac{Z_1}{Z_2} \right)$  | А               | 3268,76    | 2963,97 | 2329,12 | 1262,83 | 698,19 | 1939,80         |
| 3    | $B_{\phi\delta} = \frac{F_{н.сп} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N}$   | Тл              | 2,63       | 2,38    | 1,87    | 1,02    | 0,56   | 1,56            |
| 4    | $k_{\delta} = f(B_{\phi\delta})$   | -               | 0,6        | 0,65    | 0,75    | 0,9     | 0,98   | 0,87            |
| 5    | $c_{\beta 1} = (t_{Z1} - b_{лл1}) \cdot (1 - k_{\delta})$  | мм              | 2,75       | 2,41    | 1,72    | 0,69    | 0,14   | 0,89            |
| 6.1. | $\Delta\lambda_{н1нас} = \frac{h_{ш1} + 0,58 \cdot h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_{\beta 1}}{c_{\beta 1} + 1,5 \cdot b_{ш1}}$  | -               | 0,136      | 0,124   | 0,097   | 0,045   | 0,010  | 0,057           |
| 6.2. | $\lambda_{н1нас} = \lambda_{н1} - \Delta\lambda_{н1нас}$   | -               | 1,69       | 1,70    | 1,73    | 1,78    | 1,82   | 1,77            |
| 7    | $\lambda_{Z1нас} = k_{\delta} \cdot \lambda_{Z1}$  | -               | 0,95       | 1,03    | 1,19    | 1,42    | 1,55   | 1,37            |
| 8    | $x_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{н1нас} + \lambda_{л1нас} + \lambda_{Z1нас}}{\lambda_{н1} + \lambda_{л1} + \lambda_{Z1}}$ | Ом              | 0,564      | 0,578   | 0,607   | 0,653   | 0,678  | 0,644           |
| 9    | $c_{н1нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12н}}$   | -               | 1,023      | 1,024   | 1,025   | 1,027   | 1,028  | 1,027           |
| 10   | $c_{\beta 2} = (t_{Z2} - b_{лл2}) \cdot (1 - k_{\delta})$  | мм              | 3,08       | 2,69    | 1,92    | 0,77    | 0,15   | 1,00            |



|       |   |    |        |        |        |        |       |        |
|-------|---|----|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| 11.1. | $\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2} \cdot c_{з2}}{b_{ш2} \cdot c_{з2} + b_{ш2}}$  |    | 0,314  | 0,300  | 0,262  | 0,158  | 0,043 | 0,187  |
| 11.2. | $\lambda_{п2\xi,нас} = \lambda_{п2\xi} - \Delta\lambda_{п2нас}$   | -  | 2,06   | 2,26   | 2,58   | 2,81   | 2,98  | 2,87   |
| 12    | $\lambda_{п2нас} = k_{\delta} \cdot \lambda_{п2}$   | -  | 0,50   | 0,54   | 0,63   | 0,75   | 0,82  | 0,73   |
| 13    | $x'_{2\xi,нас} = x'_2 \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xi,нас}}{\sum \lambda_2}$<br>$= x'_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\xi,нас} + \lambda_{п2нас} + \lambda_{п1}}{\lambda_{п2} + \lambda_{п2} + \lambda_{п2}}$ | ОМ | 0,413  | 0,441  | 0,488  | 0,529  | 0,558 | 0,534  |
| 14    | $R_{пнас} = r_1 + c_{п,нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}$  | ОМ | 0,852  | 0,971  | 1,330  | 2,809  | 5,237 | 1,505  |
| 15    | $X_{пнас} = x_{1нас} + c_{п,нас} \cdot x'_{2\xi,нас}$   | ОМ | 0,986  | 1,030  | 1,108  | 1,197  | 1,252 | 1,192  |
| 16    | $I'_{2нас} = \frac{U_{ном}}{\sqrt{R_{п,нас}^2 + X_{п,нас}^2}}$  | А  | 291,67 | 268,47 | 219,57 | 124,46 | 70,58 | 197,93 |
| 17    | $I_{1нас} = \frac{I'_{2нас} \cdot \sqrt{R_{п,нас}^2 + (X_{п,нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п,нас} \cdot x_{12п}}$  | А  | 296,83 | 273,58 | 224,32 | 127,97 | 73,73 | 202,67 |
| 18    | $k'_{нас} = \frac{I_{1нас}}{I_{1п}}$  | -  | 1,135  | 1,111  | 1,070  | 1,032  | 1,027 | 1,045  |
| 19    | $I_{1*} = \frac{I_{1нас}}{I_{1ном}}$  | -  | 5,82   | 5,36   | 4,40   | 2,51   | 1,44  | 3,97   |
| 20    | $M_* = \left( \frac{I'_{2нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{S_{ном}}{s}$  | -  | 2,922  | 3,019  | 3,108  | 2,439  | 1,544 | 2,954  |

Критическое скольжение: 
$$s_{кр} = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1нас}}{c_{1пнас}} + x'_{2\xi,нас}} = \frac{0,49}{\frac{0,653}{1,027} + 0,529} = 0,42$$

# 8. Расчёт пусковых характеристик (графики)

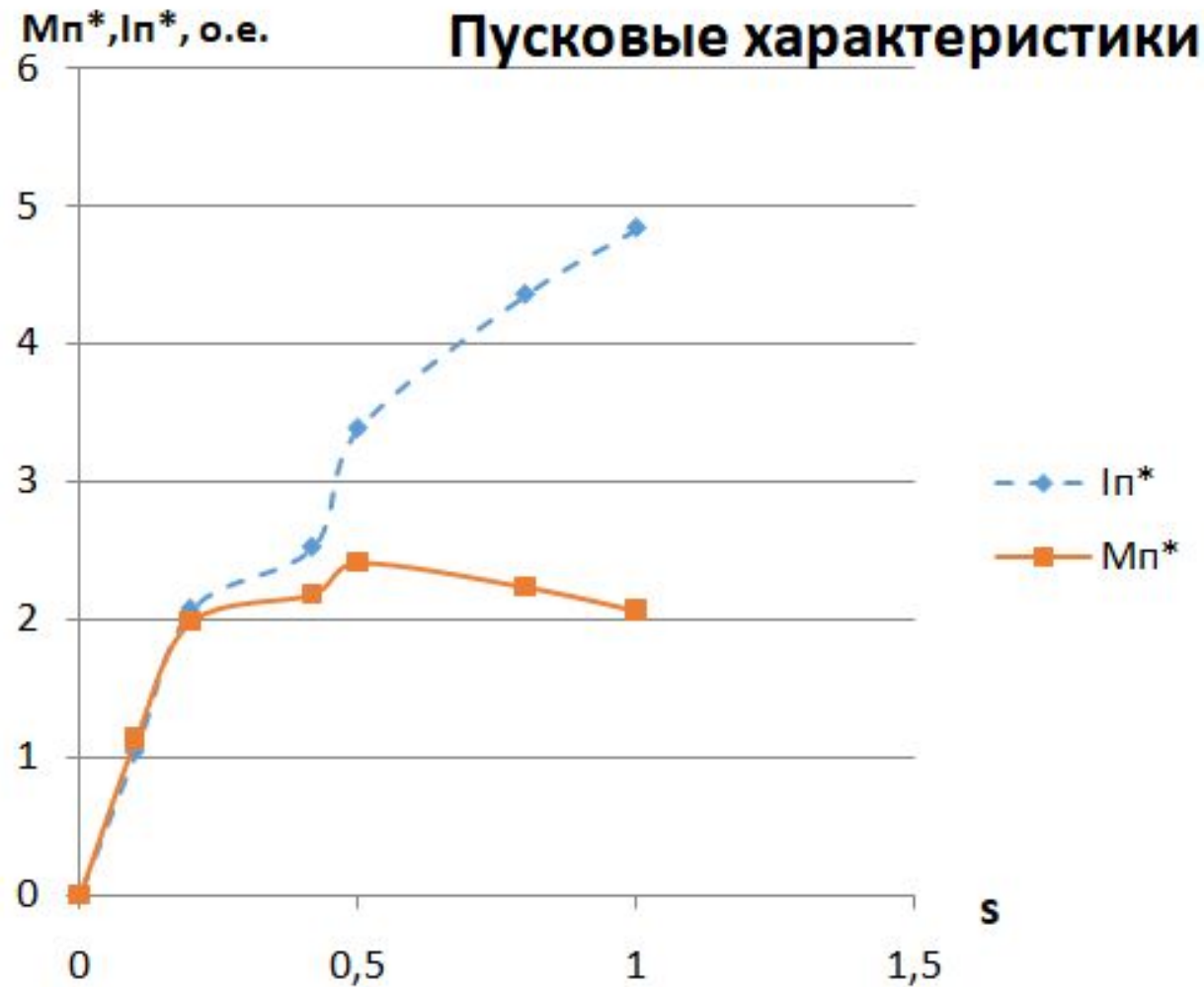


Рис. 5. Пусковые характеристики проектируемого двигателя

## 9. Тепловой расчёт

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя:  $\Delta v_{\text{пов}1} = K \frac{P'_{\text{э.п}1} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 45,64 \text{ }^\circ\text{C}$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta v_{\text{из.п}1} = \frac{P'_{\text{э.п}1}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{П}1} \cdot l_1} \left( \frac{b_{\text{из.п}1}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{1,6\lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right) = 2,01 \text{ }^\circ\text{C}$$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:  $\Delta v_{\text{из.л}1} = \frac{P'_{\text{э.л}1}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{Л}1} \cdot l_{\text{Л}1}} \left( \frac{b_{\text{из.л}1}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{h_{\text{П}1}}{12\lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right) = 0,99 \text{ }^\circ\text{C}$

Превышение температуры лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta v_{\text{пов.л}1} = \frac{K \cdot P'_{\text{э.л}1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{ВЫЛ}} \cdot \alpha_1} = 29,17 \text{ }^\circ\text{C}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя:  $\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{\text{пов}1} + \Delta v_{\text{из.п}1})2 \cdot l_1 + (\Delta v_{\text{из.л}1} + \Delta v_{\text{пов.л}1})2 \cdot l_{\text{Л}1}}{l_{\text{ср}1}} = 38,74 \text{ }^\circ\text{C}$

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды:

$$\Delta v_{\text{В}} = \frac{\sum P'_{\text{В}}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{В}}} = 28,92 \text{ }^\circ\text{C}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над окружающей средой:  $\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_{\text{В}} = 67,66 \text{ }^\circ\text{C}$

Требуемый для охлаждения расход воздуха:  $Q_{\text{В}} = \frac{k_m \sum P'_{\text{В}}}{1100 \Delta \lambda_{\text{В}}} = 0,18 \text{ м}^3/\text{с}$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором:  $Q'_{\text{В}} = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,45 \text{ м}^3/\text{с}$

Выполняется условие:  $Q'_{\text{В}} > Q_{\text{В}}$ . Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах. Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

# 10. Чертеж асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

Чертеж [2] асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в разрезе приведён на рис. 6.

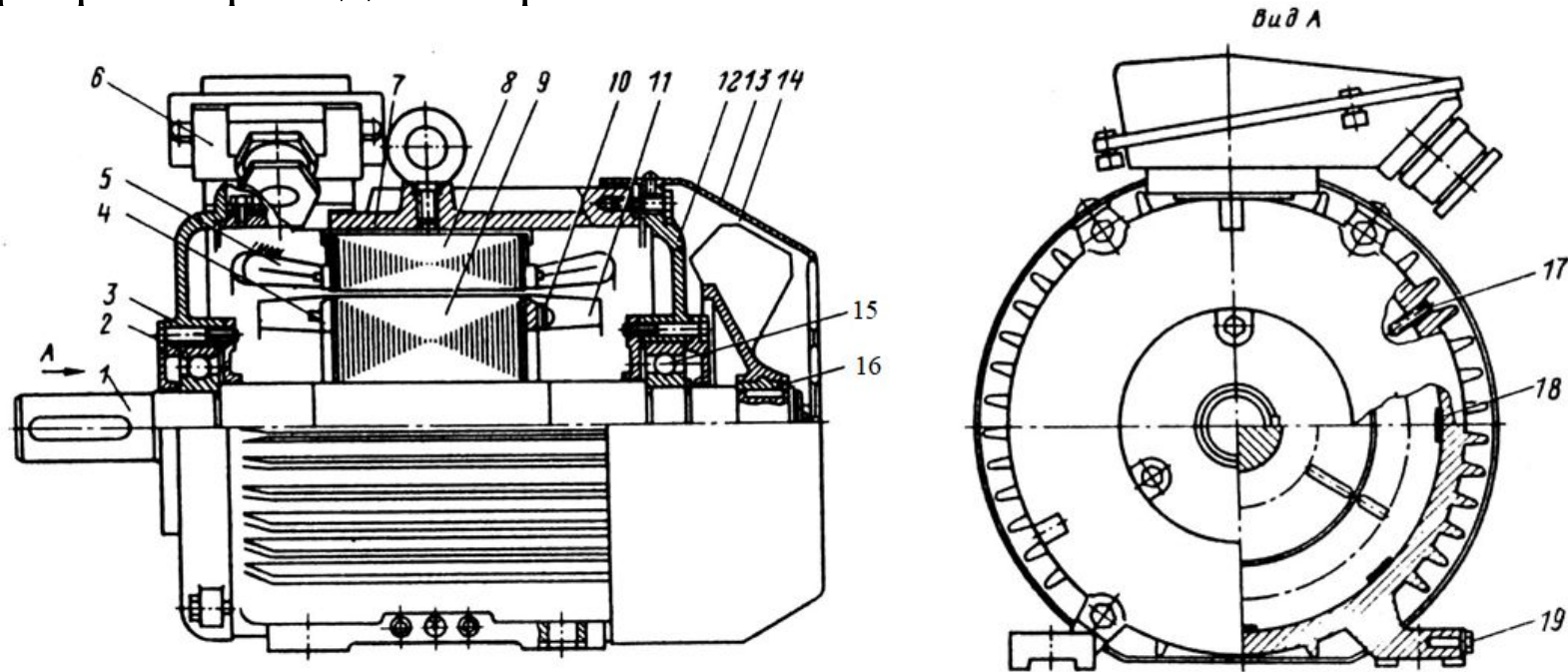


Рис. 6 – Чертеж проектируемого двигателя серии 4А

(1 — вал; 2, 15 — подшипники; 3, 12 — подшипниковые шиты; 4 — короткозамыкающие кольца ротора; 5 — лобовые части обмотки статора; 6 — коробка выводов; 7 — корпус; 8 — сердечник статора; 9 — сердечник ротора; 10 — балансировочные грузы; 11 — вентиляционные лопатки ротора; 13 — кожух вентилятора; 14 — вентилятор; 16 — втулки вентилятора; 17 — стопорные винты; 18 — скобы крепления сердечника статора; 19 — болты заземления)

# Заключение

В результате выполнения курсового проекта был спроектирован четырехполюсный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с полезной мощностью 45 кВт на напряжение сети 660В

В частности, был произведен расчет главных размеров, параметров статора, ротора, магнитной цепи, рабочего режима, расчёт потерь, рабочих и пусковых характеристик, расчёт тепловых потерь.

По техническим данным спроектированный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ и технического задания.