

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 – УЗ; 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:  $\delta = 0,7 \text{ мм}$

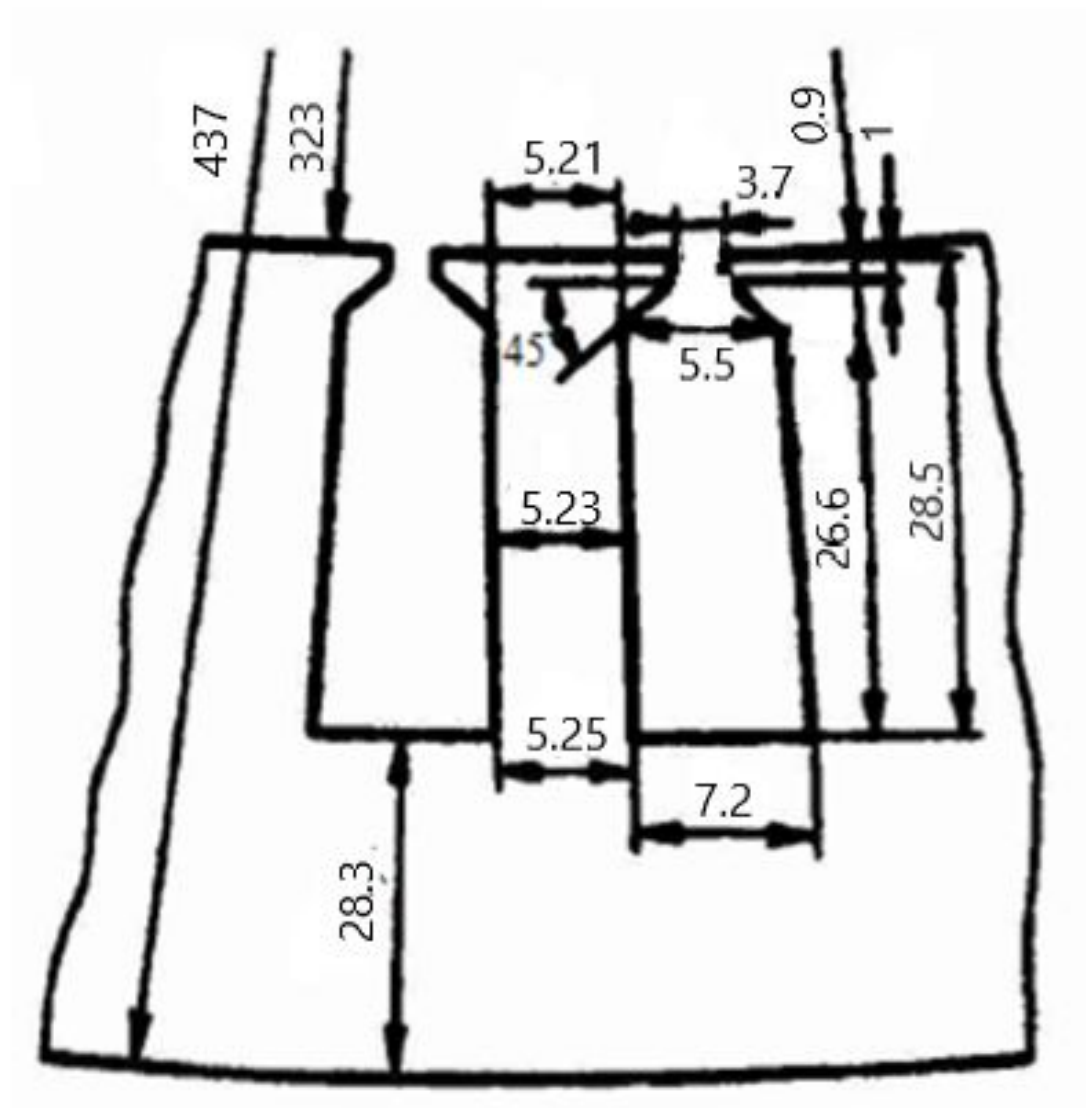


Рис. 1. - Паз и зубец статора проектируемого двигателя

### 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 -  $D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} = 295,5 \text{ мм}$



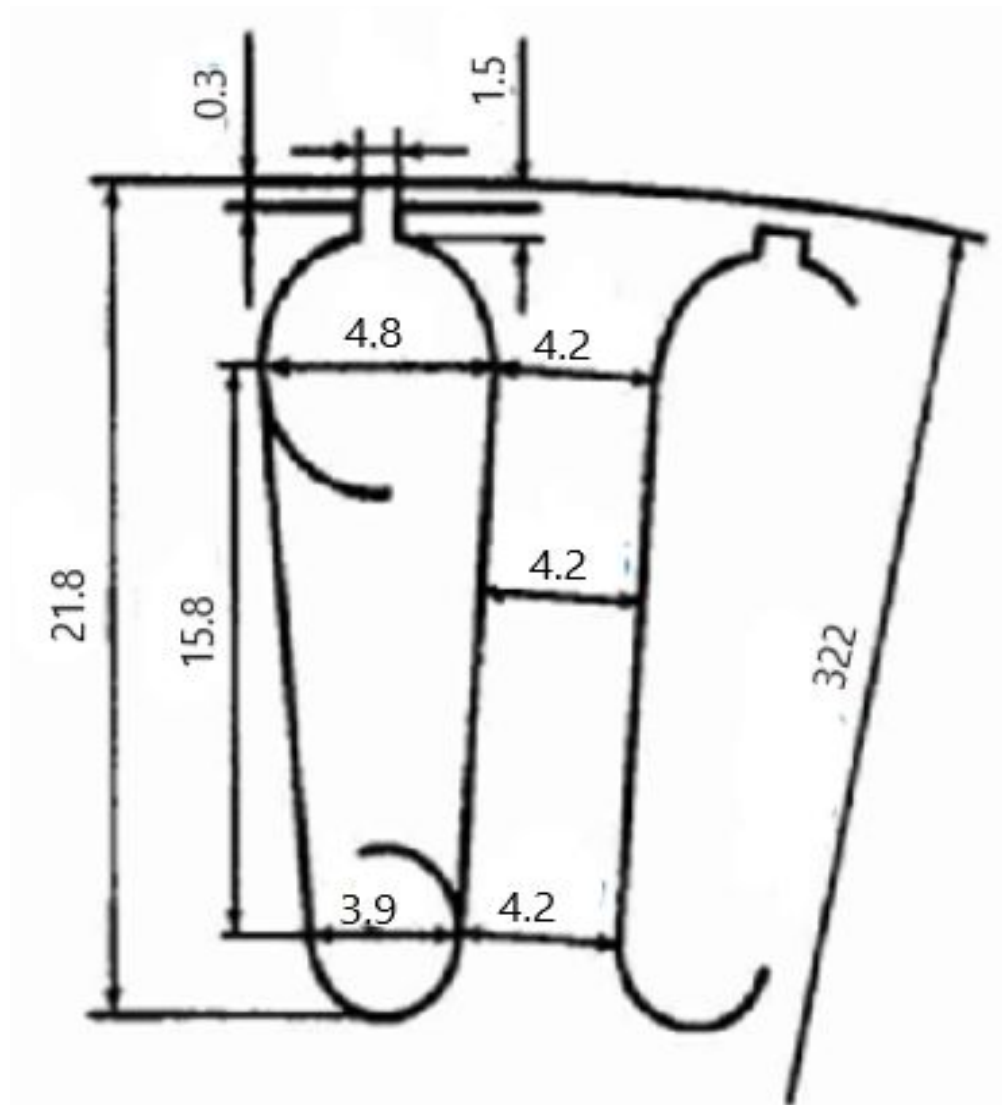


Рис. 2. - Паз ротора проектируемого двигателя

## 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	$P_1 = 3U_{\text{ном}} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3},$ 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	$P_{\text{эл}} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3},$ 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	$\sum P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} +$ $+ P_{\text{эл}} + P_{\text{эл}} + P_{\text{доп}}, \text{ кВт}$	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)

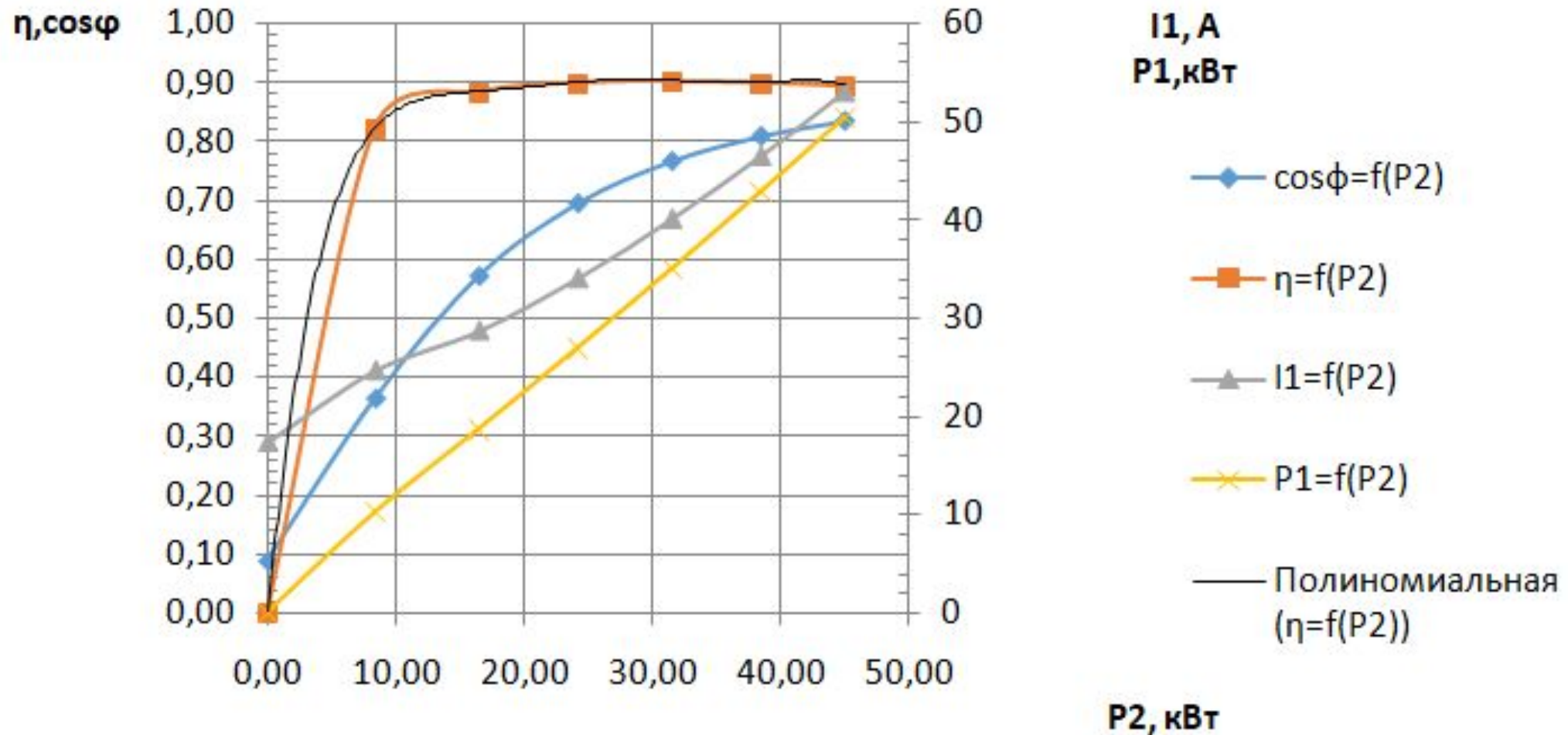


Рис. 3. Рабочие характеристики проектируемого двигателя с короткозамкнутым ротором



## 7. Расчет рабочих характеристик (графики)

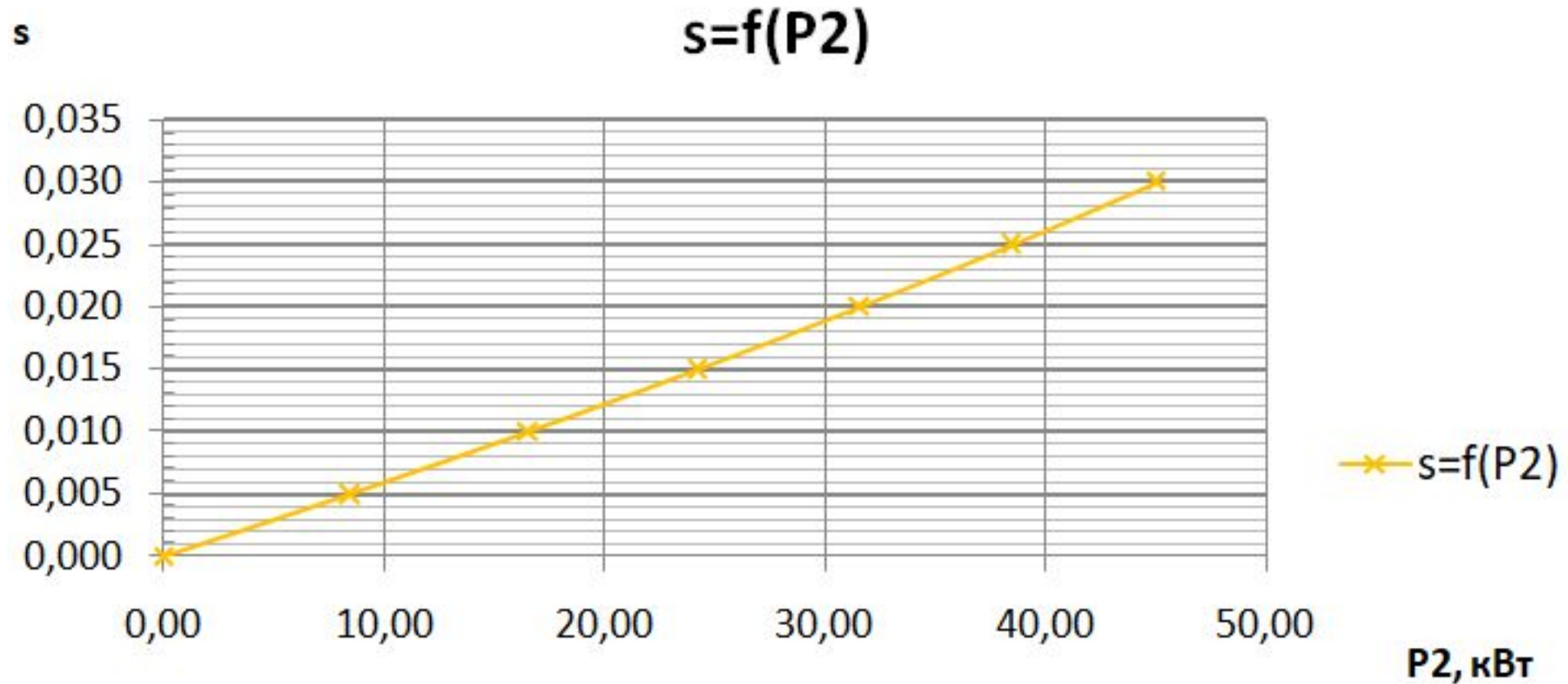


Рис. 4. Рабочие характеристики  $s=f(P_2)$  проектируемого двигателя с короткозамкнутым ротором

# 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 <sub>сп</sub>
			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	$h_r = \frac{h_c}{1 + \phi}$	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	
								0,418
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 7	244,3 4	207,5 9	122,12	69,65	191,8 3
14	$I_{1П} = \frac{I_{2'} \sqrt{R_{П}^2 + (X_{П} + x_{12П})^2}}{e_{1П} \cdot x_{12П}}$	А	261,4 1	246,1 5	209,5 5	123,94	71,79	193,9 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 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.	$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{м2} \cdot c_{з2}}{b_{м2} \cdot c_{з2} + b_{м2}}$		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	$x'_{2\xi,нас} = x'_2 \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xi,нас}}{\sum \lambda_2}$ $= x'_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\xi,нас} + \lambda_{п2нас} + \lambda_{п1}}{\lambda_{п2} + \lambda_{п2} + \lambda_{п2}}$	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: 
$$s_{кп} = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1нас}}{c_{1пнас}} + x'_{2\xi,нас}} = \frac{0,49}{\frac{0,653}{1,027} + 0,529} = 0,42$$

# 8. Расчёт пусковых характеристик (графики)

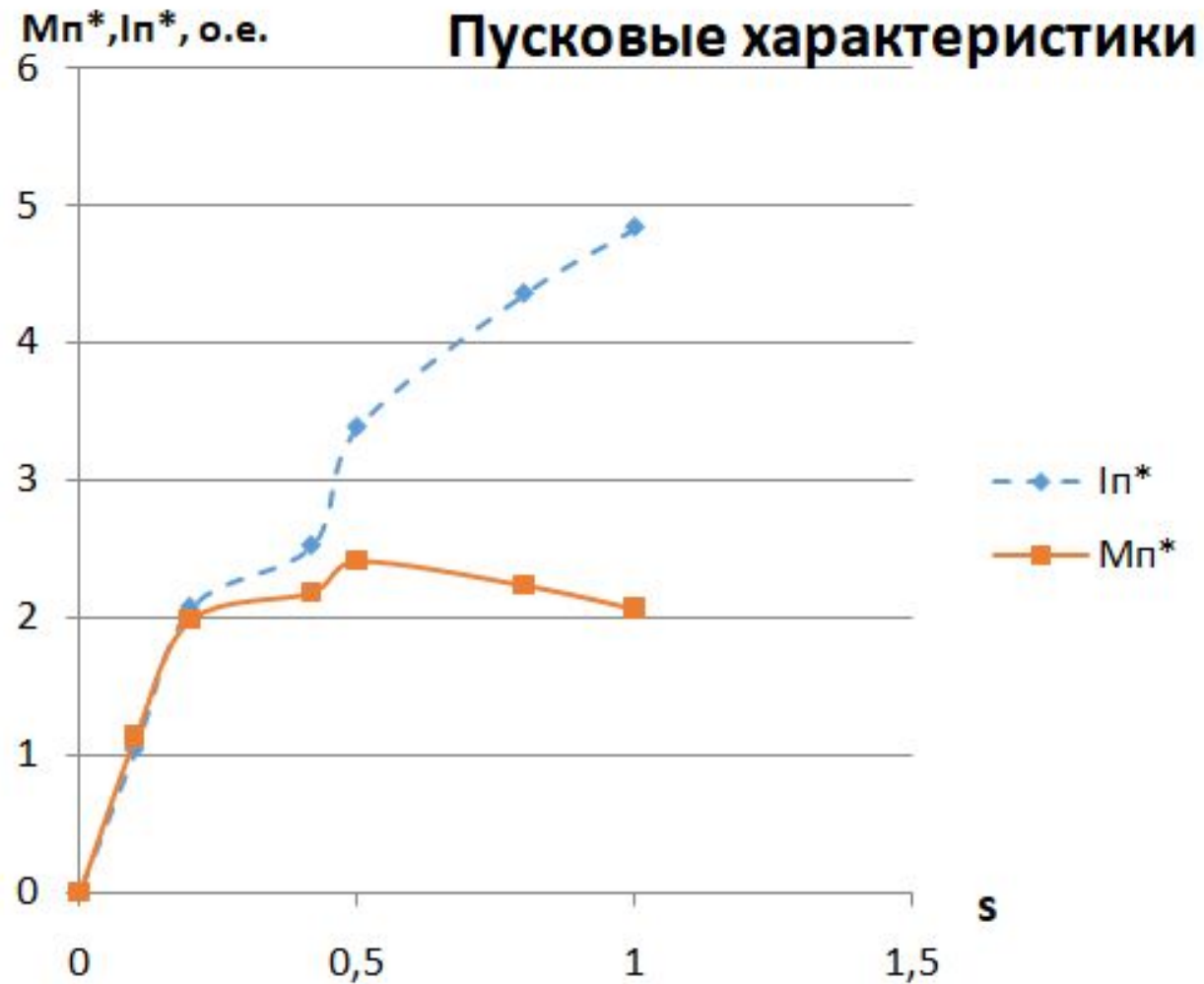


Рис. 5. Пусковые характеристики проектируемого двигателя

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

Превышение температуры лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя:

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

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.

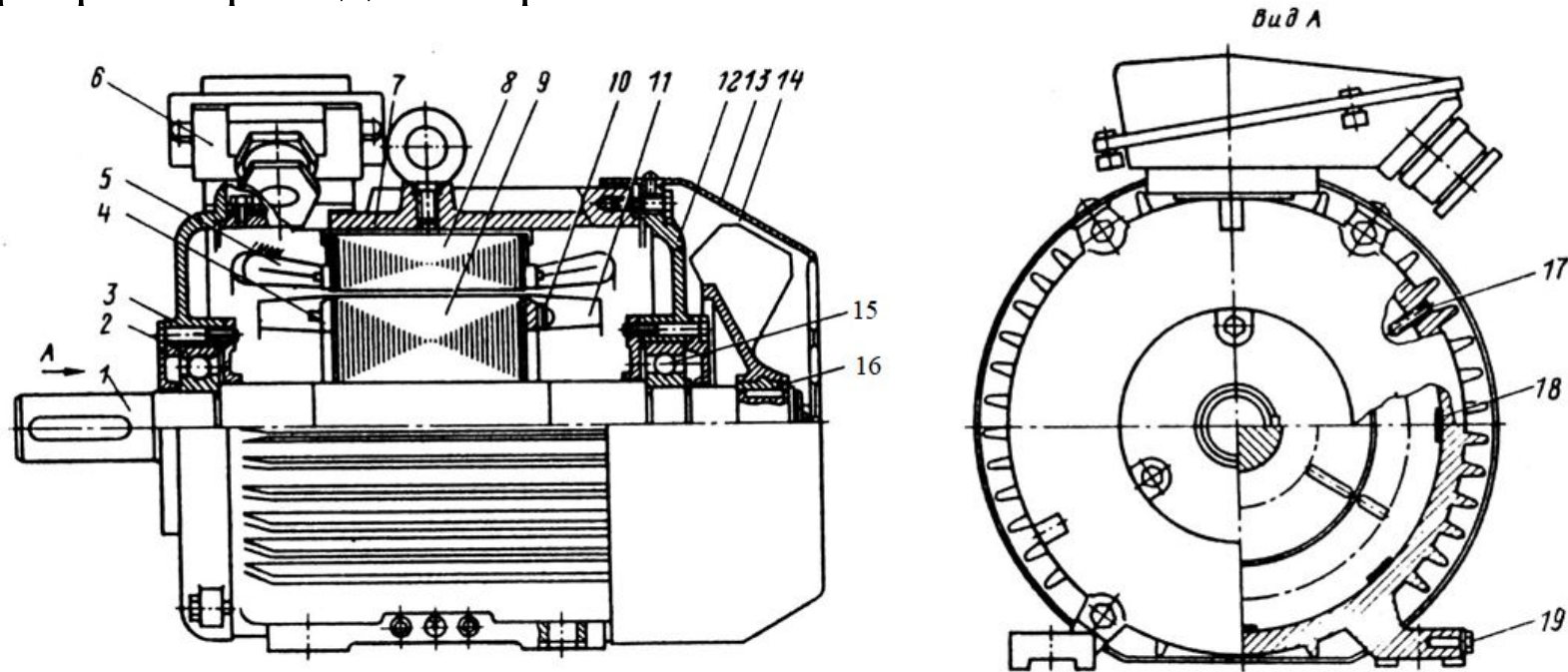


Рис. 6 – Чертеж проектируемого двигателя серии 4А

(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 лопадки 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.