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-19-4б
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 $M_{кр}/M_{н}$	Линейное напряжение, В
12	АДКЗР	45	750	2,4	660

1. Выбор главных размеров

Число пар полюсов: $p = \frac{60 f_1}{n} = \frac{60 \cdot 50}{750}$ =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 η и cos ϕ: η=91%, cosϕ=0,85.

Электромагнитные нагрузки (предварительно): $A = 40 \cdot 10^3$ А/м, B_δ=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: $\lambda = \frac{l_б}{\tau} = 1{,}535$

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: $t_{Z1} = \frac{\pi \cdot D}{Z_1} = 0{,}01058$ м

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

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

Число витков в фазе: $W_1 = \frac{u_п \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 128$

При а = 1: $u_п = a \cdot u'_п = 8$

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

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

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

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

2. Расчет параметров статора (продолжение)

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

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

Принимаем обмоточный провод марки ПЭТ-155:

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

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

Ширина зубца статора: $b_{Z1} = 5{,}23$ мм

Размеры паза в штампе: $h_п = 28{,}5$ мм; $b_1 = 5{,}5$ мм; $b_2 = 7{,}2$ мм; $h_{п.к} = 26{,}4$ мм; $b_ш = 3{,}7$мм; $h_ш = 1$мм

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки:

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

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

Коэффициент заполнения паза: $k_з = \frac{d_{из}^2 \cdot u_п \cdot n_{эл}}{S_п{}'} = 0{,}7201$ входит в $0{,}72 < k_з < 0.74$

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

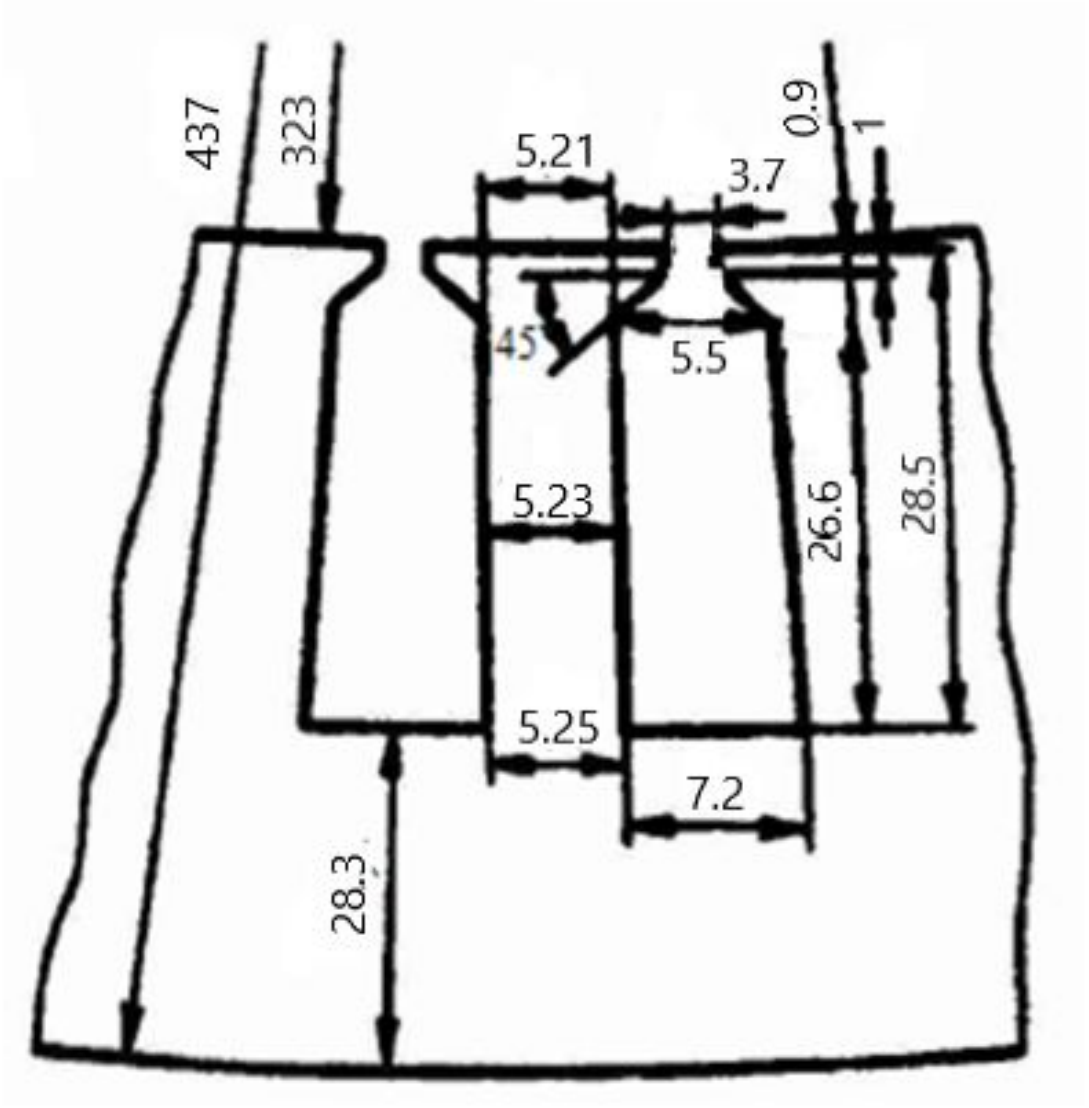

Рис. 1. - Паз и зубец статора проектируемого двигателя

3. Расчет параметров ротора

Выбор числа пазов: $Z_2 = 110$

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

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

Зубцовое деление ротора: $t_{Z2} = \dfrac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = 9{,}2$ мм

Внутренний диаметр ротора: $D_{\text{В}} = k_{\text{В}} \cdot D_a = 0{,}1005$ м

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

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

3. Расчет параметров ротора (продолжение)

Размеры паза ротора: $b_ш = 1{,}5$ мм; $h_ш = 0{,}7$ мм; $h'_ш = 0{,}3$мм; $b_{Z2} = 4{,}2$ мм;

$b_1 = 4{,}8$ мм; $b_2 = 3{,}9$ мм; $h_1 = 15{,}8$ мм; $h_{п2} = 21{,}8$ 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: $I_{кл} = \frac{I_2}{2 \cdot sin\frac{\pi p}{Z_2}} = 1272{,}19$ А.

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

Размеры короткозамкнутого кольца:

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

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

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

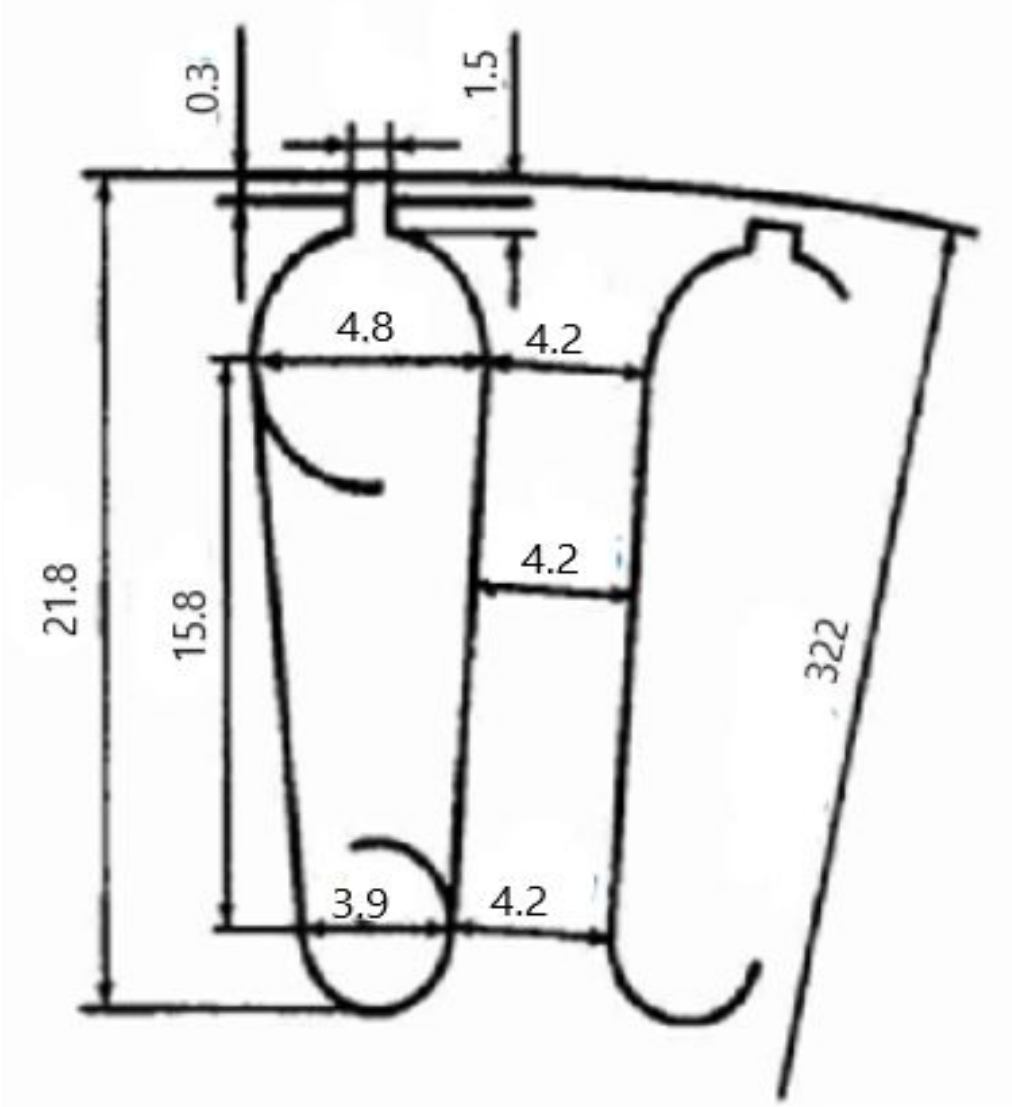

Рис. 2. - Паз ротора проектируемого двигателя

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: $F_{Z1} = 2h_{Z1} \cdot H_{Z1} = 604{,}2$ A

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора: $F_{Z2} = 2h_{Z2}H_{Z2} = 5{,}16$ 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: $F_j = L_j H_j = 3{,}88$ A

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

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

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

Намагничивающий ток: $I_\mu = \frac{p \cdot F_ц}{0{,}9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = 22{,}7$ 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: $r_1 = k_R \rho_{115} \frac{L_1}{q_{эф} a} = 0,301$ Ом

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

Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора:

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

Приводим r2 к числу витков обмотки статора: $r_2' = r_2 \frac{4m_1 (W_1 k_{об1})^2}{Z_2 k_{ск}^2} = 0,230$ Ом

Относительное значение: $r_2'^* = r_2 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,031$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

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

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

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

Приведённое к числу витков статора индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора :

$$x'_2 = x_2 \frac{4m(w_1 k_{об1})^2}{Z_2 k_{ск}^2} = 0,561 \text{ Ом} \qquad x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,10002$$

6. Расчёт потерь

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

Поверхностные потери в роторе: $P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}}(t_{Z2} - b_{\text{Ш2}})Z_2 l_{\text{ст2}} = 21{,}5$ Вт

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

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

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

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

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

Расчет параметров холостого хода:

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

7. Расчёт рабочих характеристик

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

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

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

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

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

$a' = c_1^2 = 1{,}088$ $\quad a = c_1 r_1 = 0{,}321$ $\quad b = c_1(x_1 + c_1 x_2') = 0{,}775$

Таблица 2 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

№	Расчётная формула	Скольжение S					$s_{ном}$	
		0,005	0,01	0,015	0,02	0,03	0,023	
1	$a'r_2'/s$, Ом	50,00	25,00	16,67	12,50	10,00	8,33	11,36
2	$R=a+\frac{a'r_2'}{s}$, Ом	50,35	25,35	17,02	12,85	10,35	8,68	11,71
3	$X=b+\frac{b'r_2'}{s}$, Ом	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31
4	$Z=\sqrt{R^2+X^2}$, Ом	50,37	25,38	17,07	12,92	10,43	8,78	11,79
5	$I_2''=\frac{U_{1н}}{Z}$, 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	$I_{1a}=I_{0a}+I_2''\cdot\cos\phi_2'$, А	8,98	16,39	23,64	30,71	37,57	44,23	33,48
9	$I_{1p}=I_{0p}+I_2''\cdot\sin\phi_2'$, А	22,96	23,53	24,47	25,74	27,33	29,21	26,34

Окончание табл. 2

10	$I_1=\sqrt{I_{1a}^{\ 2}+I_{1p}^{\ 2}}$, А	24,65	28,68	34,02	40,07	46,46	53,00	42,60
11	$I_2'=c_1 \cdot I_2''$, А	7,87	15,61	23,22	30,68	37,99	45,13	33,62
12	$P_1=3U_{1нам}\cdot I_{1a}\cdot 10^{-3}$, кВт	10,24	18,68	26,95	35,01	42,84	50,42	38,17
13	$P_{э1}=3I_1^2 r_1\cdot 10^{-3}$, кВт	0,55	0,74	1,05	1,45	1,95	2,54	1,64
14	$P_{э2}=3I_2'^2 r_2'\cdot 10^{-3}$, кВт	0,04	0,17	0,37	0,65	1,00	1,41	0,78
15	$P_{доб}=0{,}005\ P_1$, кВт	0,05	0,09	0,13	0,18	0,21	0,25	0,19
16	$\sum P=P_{ст}+P_{мех}+$ $+P_{э2}+P_{э1}+P_{доб}$, кВт	1,82	2,18	2,73	3,45	4,33	5,37	3,78
17	$P_2=P_1-\sum P$, 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)

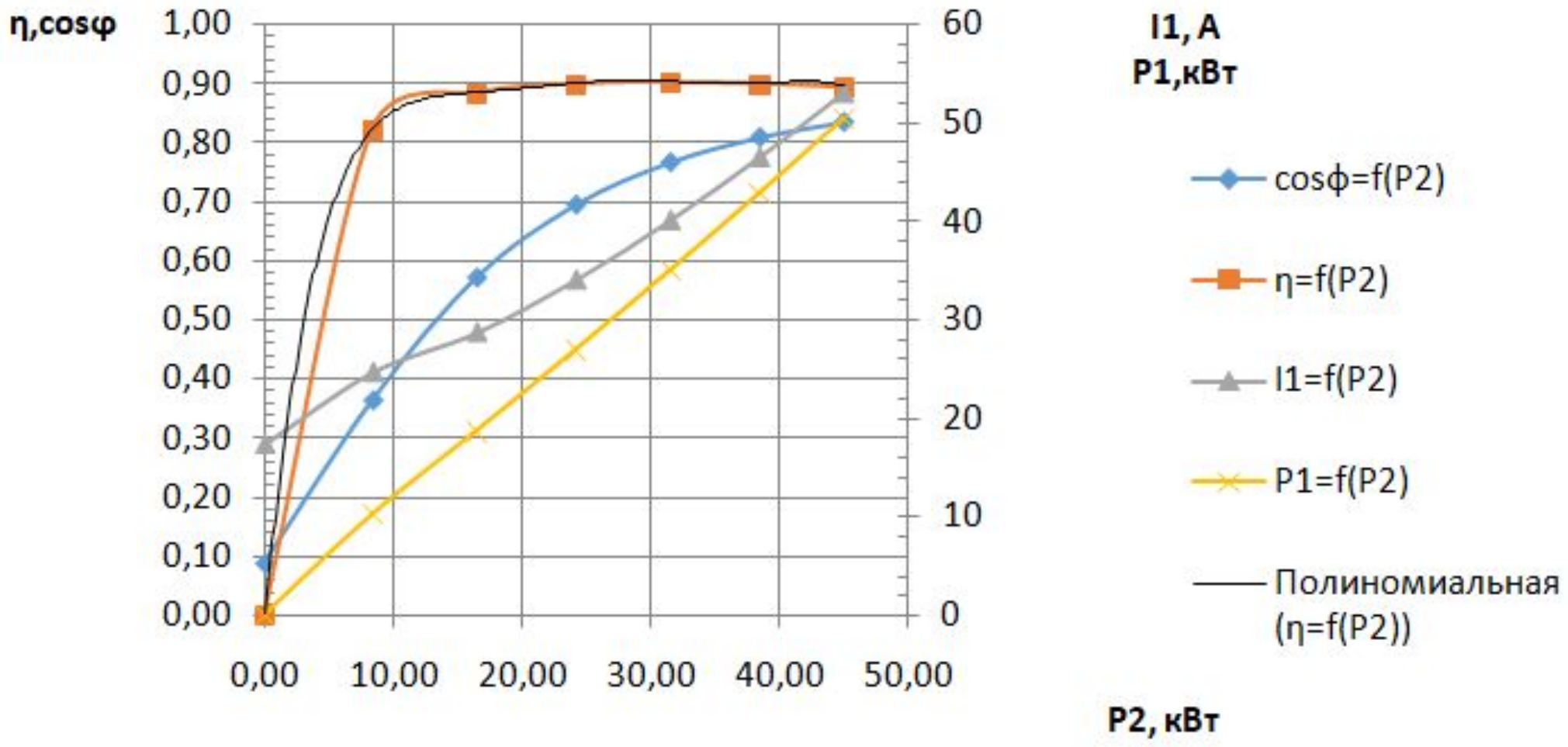

Рис. 3. Рабочие характеристики проектируемого двигателя с короткозамкнутым ротором

7. Расчет рабочих характеристик (графики)

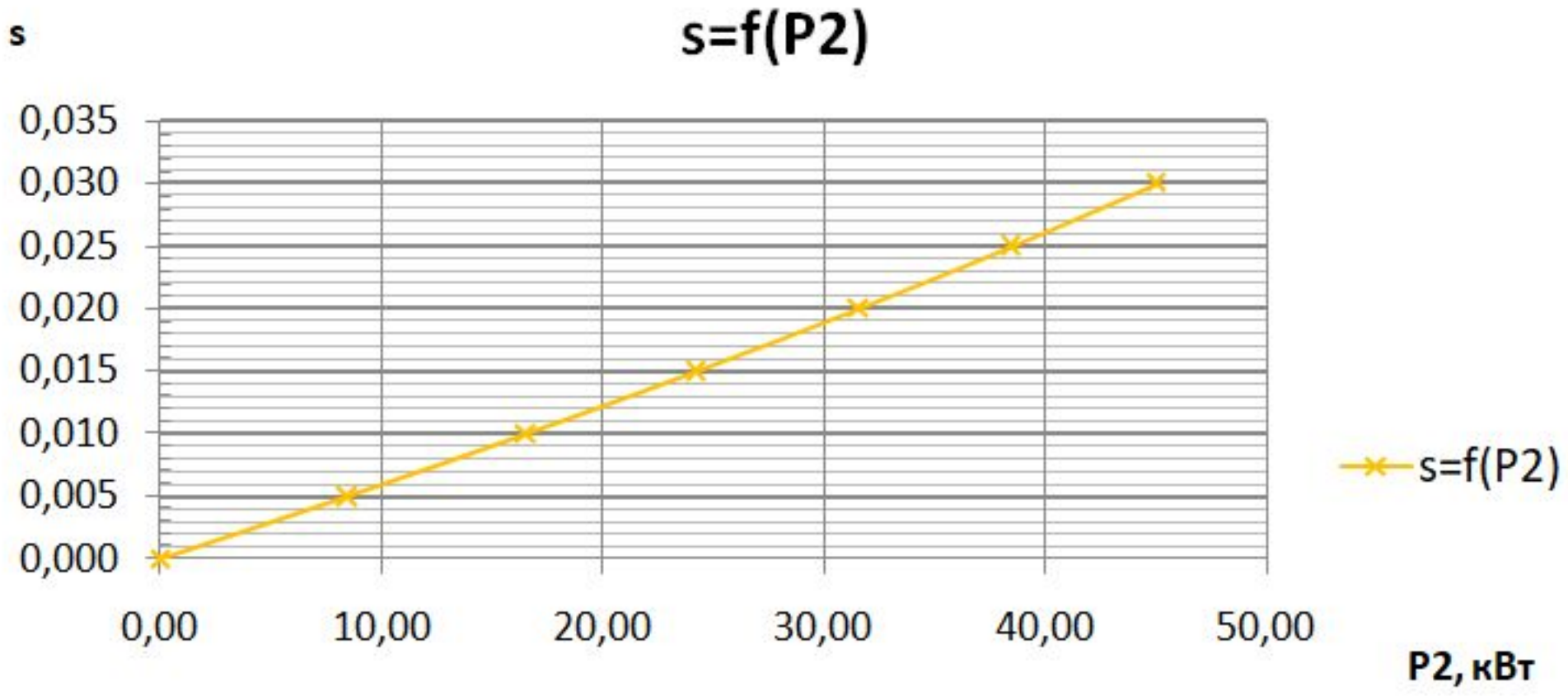

Рис. 4. Рабочие характеристики s=f (P_2) проектируемого двигателя с короткозамкнутым ротором

8. Расчёт пусковых характеристик

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

№	Расчетная формула	Размерность	Скольжение					$s_{кр}$
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,418
1	$\xi = 63{,}61 h_c \sqrt{s}$	-	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.	$q_r = \frac{\pi \cdot b^2{}_1}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2}\left(h_r - \frac{b_1}{2}\right)$	мм^2	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	$k_Д = \varphi'(\xi)$	-	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	$K_X = \frac{\lambda_{П2\xi} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}}{\lambda_{П2} + \lambda_{Л2} + \lambda_{Д2}}$	-	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	259,77	244,34	207,59	122,12	69,65	191,83
14	$I_{1П} = \frac{I_2' \cdot \sqrt{R_П^2 + (X_П + x_{12П})^2}}{c_{1П} \cdot x_{12П}}$	А	261,41	246,15	209,55	123,94	71,79	193,91

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	Размерность	Скольжение					$s_{кр}$
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	0,418
1	$k_{нас}$	-	1,35	1,3	1,2	1,1	1,05	1,08
2	$F_{п.ср} = 0,7\frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot u_п}{a}\left(k'_\beta + k_{y1} \cdot k_{об1}\frac{Z_1}{Z_2}\right)$	А	3268,76	2963,97	2329,12	1262,83	698,19	1939,80
3	$B_{Фδ} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	2,63	2,38	1,87	1,02	0,56	1,56
4	$k_\delta = f(B_{Фδ})$	-	0,6	0,65	0,75	0,9	0,98	0,87
5	$c_{э1} = (t_{Z1} - b_{Ш1}) \cdot (1 - k_\delta)$	мм	2,75	2,41	1,72	0,69	0,14	0,89
6.1.	$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш1} + 0,58 \cdot h_к}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_{э1}}{c_{э1} + 1,5 \cdot b_{ш1}}$	-	0,136	0,124	0,097	0,045	0,010	0,057
6.2.	$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас}$	-	1,69	1,70	1,73	1,78	1,82	1,77
7	$\lambda_{Д1нас} = k_\delta \cdot \lambda_{Д1}$	-	0,95	1,03	1,19	1,42	1,55	1,37
8	$x_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1} = x_1 \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + }{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_л}$	Ом	0,564	0,578	0,607	0,653	0,678	0,644
9	$c_{п1нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}}$	-	1,023	1,024	1,025	1,027	1,028	1,027
10	$c_{э2} = (t_{Z2} - b_{Ш2}) \cdot (1 - k_\delta)$	мм	3,08	2,69	1,92	0,77	0,15	1,00

Окончание табл. 4

11.1.	$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{c_{э2}}{c_{э2} + b_{ш2}}$		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	$\lambda_{Д2нас} = k_{\delta} \cdot \lambda_{Д2}$	-	0,50	0,54	0,63	0,75	0,82	0,73
13	$x'_{2\xi нас} = x_2' \frac{\Sigma\lambda_{2\xi нас}}{\Sigma\lambda_2} = x_2' \frac{\lambda_{п2\xi нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}}$	Ом	0,413	0,441	0,488	0,529	0,558	0,534
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{п1.нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	0,852	0,971	1,330	2,809	5,237	1,505
15	$X_{п.нас} = x_{1нас} + c_{П1.нас} \cdot x'_{2\xi нас}$	Ом	0,986	1,030	1,108	1,197	1,252	1,192
16	$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R^2_{п.нас} + X^2_{п.нас}}}$	А	291,67	268,47	219,57	124,46	70,58	197,93
17	$I_{1нас} = \frac{I'_{2нас} \cdot \sqrt{R^2_{п.нас} + (X_{п.нас} + x_{12П})}}{c_{1п.нас} \cdot x_{12П}}$	А	296,83	273,58	224,32	127,97	73,73	202,67
18	$k'_{нас} = \frac{I_{1нас}}{I_{1n}}$	-	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)

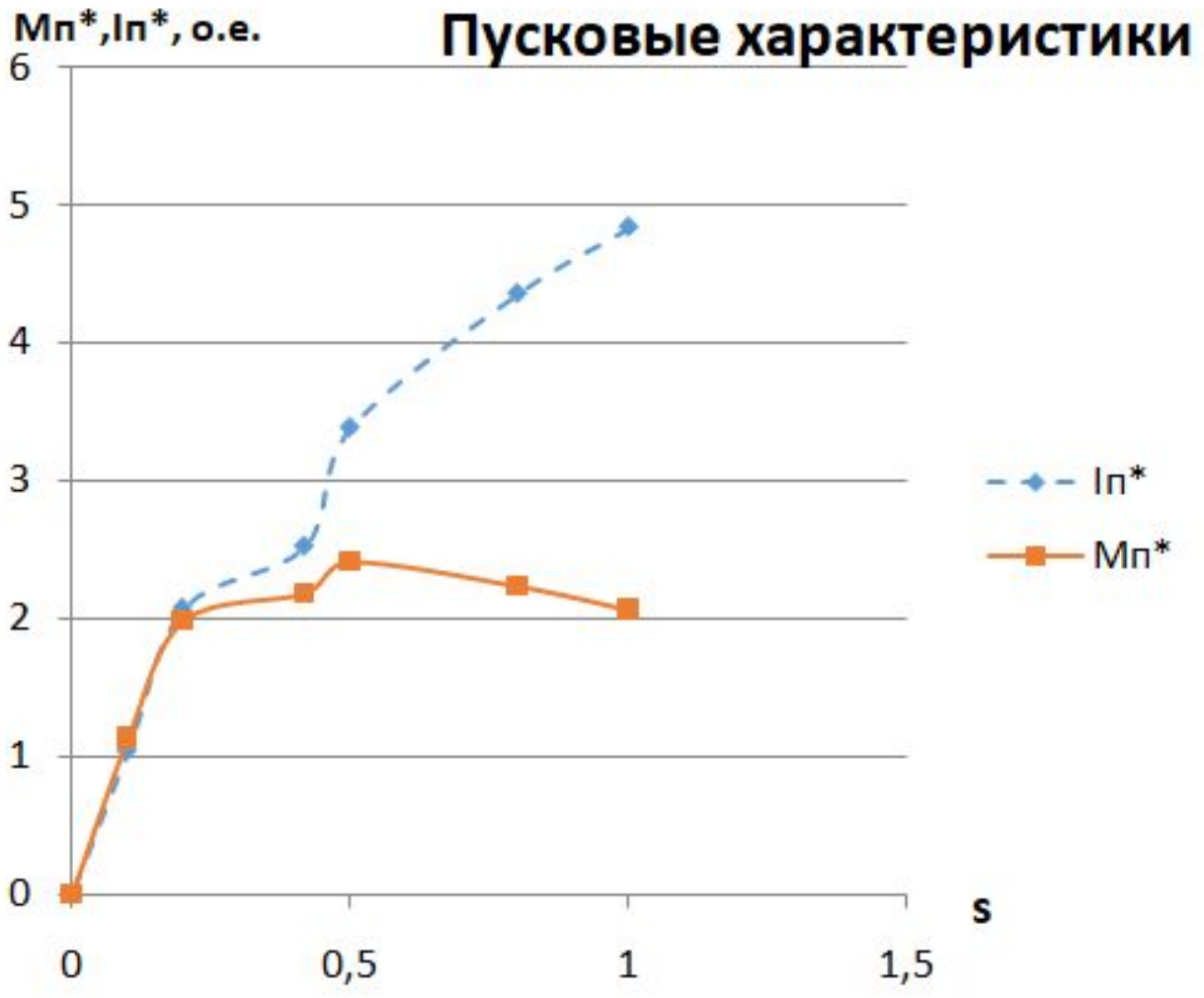

Рис. 5. Пусковые характеристики проектируемого двигателя

9. Тепловой расчёт

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя: $\Delta\nu_{пов1} = K\frac{P'_{э.п1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 45,64\ °C$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta\nu_{из.п1} = \frac{P'_{э.п1}}{Z_1 \cdot П_{П1} \cdot l_1}\left(\frac{b_{из.п1}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_1 + b_2}{1,6\lambda'_{экв}}\right) = 2,01°C$$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей: $\Delta\nu_{из.л1} = \frac{P'_{э.л1}}{2 \cdot Z_1 \cdot П_{Л1} \cdot l_{л1}}\left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{экв}} + \frac{h_{П1}}{12\lambda'_{экв}}\right) = 0,99°C$

Превышение температуры лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta\nu_{пов.л1} = \frac{К \cdot P'_{э.л1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{выл} \cdot a_1} = 29,17°C$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя: $\Delta\nu'_1 = \frac{(\Delta\nu_{пов1} + \Delta\nu_{из.п1})2 \cdot l_1 + (\Delta\nu_{из.л1} + \Delta\nu_{пов.л1})2 \cdot l_{л1}}{l_{ср1}} = 38,74°C$

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды:

$$\Delta\nu_в = \frac{\sum P'_в}{s_{кор} \cdot \alpha_в} = 28,92°C$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над окружающей средой: $\Delta\nu_1 = \Delta\nu'_1 + \Delta\nu_в = 67,66°C$

Требуемый для охлаждения расход воздуха: $Q_в = \frac{k_m \sum P'_в}{1100\Delta\lambda_в} = 0,18\ м^3/с$

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

Выполняется условие: $Q'_в > Q_в$. 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.

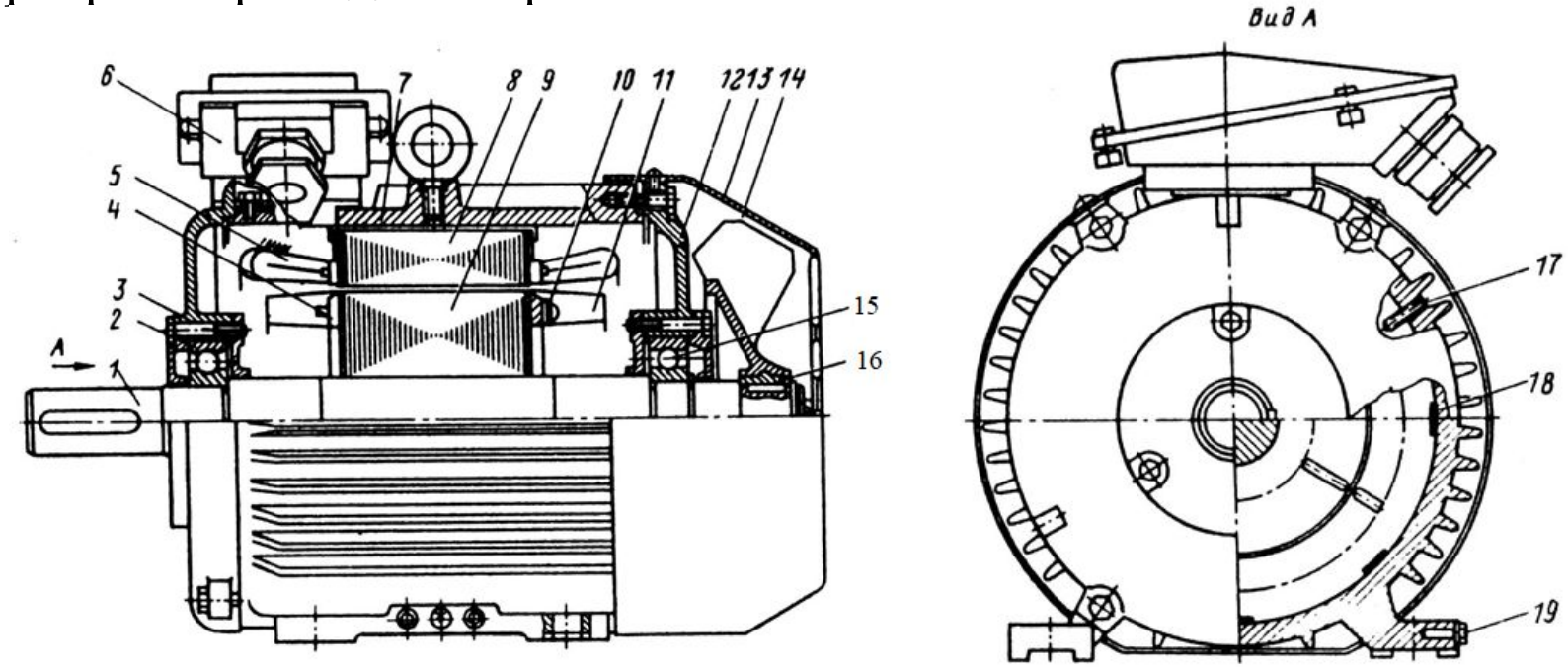

Рис. 6 – Чертёж проектируемого двигателя серии 4А

(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 — сто порные 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.