

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-19-36

Кузовкин М.А.

Проверил: доцент каф. МСА

Даденков Д.А.

Пермь 2021 г.

# Исходные данные

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

Конструктивное исполнение – IM1001, степень защиты – IP 44, способ охлаждения – IC 0141; климатические условия – УЗ, класс нагревостойкости изоляции – F.

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	90	1500	2,6	660

# 1. Выбор главных размеров

- Число пар полюсов:  $p = \frac{60 \cdot f_1}{n} = 2; 2p = 4$
- Высота оси вращения:  $h = 250$  мм
- Наружный диаметр статора:  $D_a = 0,437$  м
- Внутренний диаметр статора:  $D = K_D D_a = 0,28842$  м
- Полюсное деление:  $\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = 0,227$  м
- Предварительные значения  $\eta$  и  $\cos \phi$ :  $\eta = 93\%, \cos \phi = 0,908$
- Электромагнитные нагрузки (предварительно):  $A = 39 \cdot \frac{10^3 \text{ A}}{\text{м}}; B_\delta = 0,7 \text{ Тл}$
- Расчетная длина магнитопровода :  $l_\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{\text{об1п}} \cdot A \cdot B_\delta} = 0,2573$  м
- Проверка правильности выбора главных размеров:  $\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = 1,13586$   
 $0,75 < \lambda < 1,15$  -находится в допустимых пределах

## 2. Расчет параметров статора

- Число пазов статора:  $Z_1 = 60$  ЧИСЛО ПАЗОВ НА ПОЛЮС И фазу:  $q_1 = \frac{Z_1}{(2pm)} = 5$   
 $t_{Z1} = \frac{\pi \cdot D}{Z_1} = 0,0151 \text{ м}$
- Зубцовое деление статора:  $I_{1\text{НОМ}} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot \eta \cdot \cos\phi} = 93,491 \text{ А}$
- Номинальный ток обмотки статора:  $u'_\pi = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1\text{НОМ}} \cdot Z_1} = 6,3 \text{ В}$
- Число эффективных проводников в пазу (предварительно):  $W_1 = \frac{u_\pi \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 65$  При  $a=4$ :  $u_\pi = a \cdot u'_\pi = 26$
- Число витков в фазе:  $A = \frac{2 \cdot I_{1\text{НОМ}} \cdot W_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = 40240,02 \text{ А/м}$
- Линейная нагрузка:  $\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1\text{НОМ}}}{4k_B \cdot W_1 \cdot k_{\text{об1}} \cdot f} = 0.0284 \text{ Вб}$
- Магнитный поток:  $B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} = 0,76443 \text{ Тл}$
- Индукция в воздушном зазоре:  $J = \frac{(AJ_1)}{A} = 4746518,1 \text{ А/м}^2$
- Плотность тока в обмотке статора (предварительно):

## 2. Расчет параметров статора (продолжение)

•

- Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно):  $q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot J_1} = 4,9242 \text{ мм}^2$
- Сечение эффективного проводника, принимаем  $n_{\text{эл}} = 4$ :  $q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = 1,231 \text{ мм}^2$
- Принимаем обмоточный провод марки ПЭТ-155:

Окончательно:  $q_{\text{эл}} = 1,227 \text{ мм}^2$ ;  $d_{\text{из}} = 1,33 \text{ мм}$ ;  $d_{\text{эл}} = 1,25 \text{ мм}$

- Плотность тока в обмотке статора (окончательно):  $J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = 4.7622 \text{ А/мм}^2$
- Ширина зубца статора:  $b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot l_{\delta}}{B_{z1} \cdot l_{\text{ст1}} \cdot k_c} = 7 \text{ мм}$
- Размеры паза в штампе:  $h_{\text{п}} = 34,6 \text{ мм}$ ;  $b_1 = 8,5 \text{ мм}$ ;  $b_2 = 11,7 \text{ мм}$ ;  $h_{\text{п.к}} = 31,2 \text{ мм}$ ;  $b_{\text{ш}} = 3,7 \text{ мм}$ ;  $h_{\text{ш}} = 1 \text{ мм}$
- Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки:  
$$S'_{\text{п}} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{\text{п.к.}} - (S_{\text{из}} + S_{\text{пр}}) = 254,6 \text{ мм}^2$$
- Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу:  $S_{\text{из}} = 40,23 \text{ мм}^2$
- Коэффициент заполнения паза:  $k_3 = \frac{d_{\text{из}}^2 \cdot u_{\text{п}} \cdot n_{\text{эл}}}{S'_{\text{п}}} = 0.7220.72$  входит в  $0,72 < k_3 < 0.74$
- Выбор воздушного зазора:  $\delta = 1 \text{ мм}$

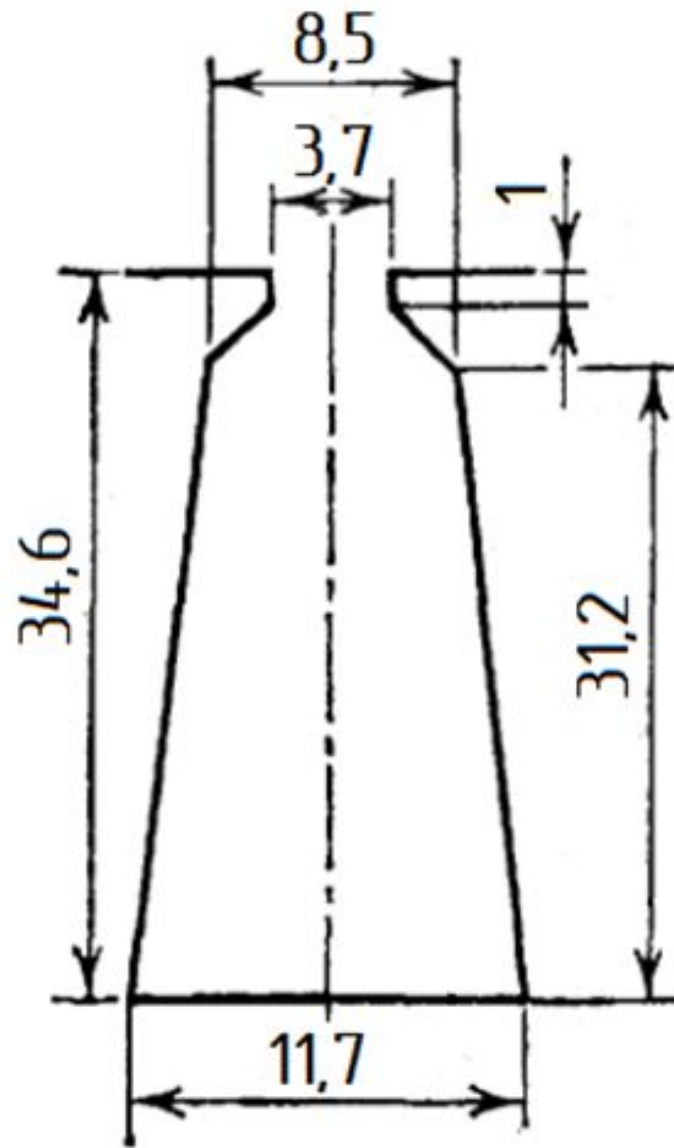


Рис. 1. - Паз статора проектируемого двигателя

### 3. Расчет параметров ротора

- Выбор числа пазов:  $Z_2 = 52$
- Внешний диаметр ротора:  $D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,28642 \text{ м}$
- Длина магнитопровода:  $l_2 = l_1 = 0,2573 \text{ м}$
- Зубцовое деление ротора:  $t_{Z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = 17,304 \text{ мм}$
- Внутренний диаметр ротора:  $D_B = k_B \cdot D_a = 0,1005 \text{ м}$
- Ток в обмотке ротора:  $I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 591,0176 \text{ А}$
- Площадь поперечного сечения стержня  
(предварительно):

$$q_{\text{п}} = \frac{I_2}{J_2} = 218,895 \text{ мм}^2$$

### 3. Расчет параметров ротора (продолжение)

- Размеры паза ротора:  $b_{\text{ш}} = 1,5 \text{ мм}$ ;  $h_{\text{ш}} = 0,7 \text{ мм}$ ;  $h'_{\text{ш}} = 0,7 \text{ мм}$ ;  $b_{Z2} = 7,37 \text{ мм}$   
 $b_1 = 9,2 \text{ мм}$ ;  $b_2 = 6,6 \text{ мм}$ ;  $h_1 = 21,5 \text{ мм}$ ;  $h_{\text{п2}} = 30,8 \text{ мм}$

- Площадь поперечного сечения стержня (окончательно):

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + 0.5(b_1 + b_2)h_1 = 220,194 \text{ мм}^2$$

- Плотность тока в стержне (окончательно):  $J_2 = \frac{I_2}{q_c} = 2,6841 \text{ А/мм}^2$
- Ток в кольце:  $I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{2 \cdot \sin \frac{\pi p}{Z_2}} = 2451,609 \text{ А}$
- Сечение короткозамкнутого кольца:  $q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = 1074,577 \text{ мм}^2$
- Размеры короткозамкнутого кольца:

Высота короткозамкнутого кольца -  $h_{\text{кл}} = 1,25 \cdot h_{\text{п2}} = 38,5 \text{ мм}$

Длина короткозамкнутого кольца -  $b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}} = \frac{1074,577}{38,5} = 27,9 \text{ мм}$

Средний диаметр короткозамкнутого кольца -  $D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 0,24792 \text{ м}$



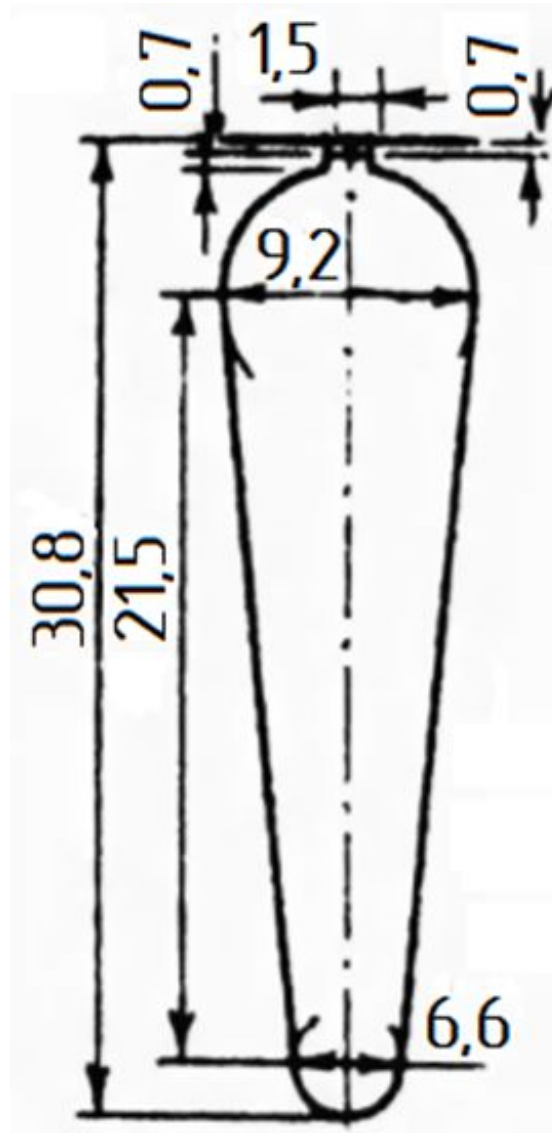


Рис. 2. - Паз ротора проектируемого двигателя

## 4. Расчет магнитной цепи

- Магнитопровод из электротехнической стали 2214
- Магнитное напряжение воздушного зазора:  $F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 1358,14 \text{ A}$
- Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:  $F_{Z1} = 2h_{Z1} \cdot H_{Z1} = 131,48 \text{ A}$
- Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:  $F_{Z2} = 2h_{Z2} H_{Z2} = 194,102 \text{ A}$
- Коэффициент насыщения зубцовой зоны:  $k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} = 1,24$   
 $1,2 < k_Z < 1,6$  - в допустимых пределах.
- Магнитное напряжение ярма статора:  $F_a = L_a H_a = 223,74 \text{ A}$
- Магнитное напряжение ярма ротора:  $F_j = L_j H_j = 25,295 \text{ A}$
- Магнитное напряжение цепи на два полюса:  $F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 1932,75 \text{ A}$
- Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя:  $k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\delta}} = 1,4231$   
 $1,3 < k_{\mu} < 1,5$  в допустимых пределах.
- Намагничивающий ток:  $I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\Sigma}}{0,9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{a61}} = 24,21 \text{ A}$
- Относительное значение намагничивающего тока:  $I_{\mu^*} = \frac{I_{\mu}}{I_{1\text{ном}}} = 0,26 \text{ о. е.}$   
 $0,25 < I_{\mu^*} < 0,3$  в допустимых пределах.

## 5. Расчет параметров рабочего режима

- Активное сопротивление обмотки статора:  $r_1 = k_R \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\text{эф}} a} = 0,097 \text{ Ом}$
- Относительное значение:  $r_{1*} = r_1 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,02392 \text{ о. е.}$
- Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора:  

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 8,03998 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$
- Приводим  $r_2$  к числу витков обмотки статора:  $r_2' = r_2 \frac{4m_1(W_1 k_{\text{о61}})^2}{Z_2 k_{\text{СК}}^2} = 0,064894 \text{ Ом}$
- Относительное значение:  $r_{2*}' = r_2' \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,015966 \text{ о. е.}$
- Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:  

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_{\delta}'}{pq} (\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}) = 0,37375 \text{ Ом} \quad x_1^* = x_1 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,091954 \text{ о. е.}$$
- Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:  

$$x_2 = 7,9 f_1 l_{\delta}' (\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}}) = 0,000516 \text{ Ом}$$
- Приведённое к числу витков статора индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора :  

$$x_2' = x_2 \frac{4m(w_1 k_{\text{о61}})^2}{Z_2 k_{\text{СК}}^2} = 0,416 \text{ Ом} \quad x_{2*}' = x_2' \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,102376 \text{ о. е.}$$

## 6. Расчёт потерь

- Основные потери в стали статора:  $P_{\text{ст.осн}} = p_{\frac{1.0}{50}} \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta (k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_{Z1}^2 m_{Z1}) = 926,24 \text{ Вт}$
- Поверхностные потери в роторе:  $P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} (t_{Z2} - b_{\text{ш2}}) Z_2 l_{\text{ст2}} = 44,44 \text{ Вт}$
- Пульсирующие потери:  $P_{\text{пул2}} = 0,11 \left( \frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пул2}} \right)^2 m_{Z2} = 140,93 \text{ Вт}$
- Сумма добавочных потерь в стали:  $P_{\text{пов1}} \text{ и } P_{\text{пул1}} \approx 0$

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пул1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} = 185,372 \text{ Вт}$$

- Полные потери в стали:  $P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 1111,615 \text{ Вт}$
- Механические потери:  $P_{\text{мех}} = K_T \left( \frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 600,565 \text{ Вт}$
- Расчет параметров холостого хода:

$$P_{\text{э1х.х}} = m \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 = 170,9019 \text{ Вт} \quad \cos \phi_{\text{х.х}} = \frac{I_{\text{х.х.а}}}{I_{\text{х.х}}} = 0,068077 \quad I_{\text{х.х}} = \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_\mu^2} = 24,26423 \text{ А}$$

## 7. Расчёт рабочих характеристик

- Активное сопротивление, характеризующее магнитные

потери в схеме замещения:  $r_{12} = \frac{P_{\text{ст.очн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = 0,526853 \text{ Ом}$

- Сопротивление взаимной индуктивности:  $x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} - x_1 = 15,324 \text{ Ом}$

- Модуль комплексного коэффициента:  $c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1,0246$

- Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.очн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3U_{1\text{ном}}} = 0,962407 \text{ А}$$

$$a' = c_1^2 = 1,049734 \quad a = c_1 r_1 = 0,0996 \text{ Ом} \quad b = c_1 (x_1 + c_1 x_2') = 0,81978 \text{ Ом}$$

Таблица 2 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

№ п/п	Расчётная формула	Еде- ница	Скольжение s						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	$S_{ном}=0,0159$
1	$a' r_2' / s$	Ом	13,624	6,812	4,541	3,406	2,725	2,271	4,267
2	$R = a + \frac{a' r_2'}{s}$	Ом	13,7239	6,9117	4,641	3,5057	2,8245	2,37	4,366
3	$X = b + \frac{b' r_2'}{s}$	Ом	0,8198	0,8198	0,8198	0,8198	0,8198	0,8198	0,8198
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	13,748	6,96	4,713	3,6	2,941	2,51	4,442
5	$I_2'' = \frac{U_{1ном}}{Z}$	А	27,64	54,598	80,63	105,556	129,21	151,39	85,547
6	$\cos \phi_2' = \frac{R}{Z}$	-	0,998	0,993	0,985	0,974	0,96	0,944	0,983
7	$\sin \phi_2' = \frac{X}{Z}$	-	0,059	0,118	0,174	0,228	0,279	0,327	0,184
8	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' \cos \phi_2'$	А	28,547	55,178	80,383	103,774	125	143,875	85,055
9	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' \sin \phi_2'$	А	25,839	30,65	38,237	48,275	60,257	73,712	39,948

Окончание табл. 2

10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	38,5	63,12	89	114,45	138,76	161,66	93,97
11	$I_2' = c_1 I_2''$	А	28,32	55,94	82,61	108,15	132,39	155,11	87,65
12	$P_1 = 3U_{\text{ном}} I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	32,544	62,9	91,637	118,3	142,5	164,02	96,963
13	$P_{31} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,432	1,162	2,31	3,82	5,615	7,621	2,575
14	$P_{32} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,156	0,609	1,328	2,277	3,412	4,684	1,495
15	$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$	кВт	0,1627	0,3145	0,4581	0,5915	0,7125	0,8201	0,4848
16	$\sum P = P_{cm} + P_{\text{мех}} + P_{13} + P_{32} + P_{\text{доб}}$	кВт	2,463	3,7977	5,8083	8,401	11,4517	14,8373	6,267
17	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	30,081	59,1	85,8287	109,899	131,048	149,183	90,696
18	$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	-	0,9243	0,9396	0,9366	0,929	0,9196	0,9095	0,935
19	$\cos \phi = \frac{I_{1a}}{I_1}$	-	0,7415	0,8742	0,9032	0,9067	0,901	0,8899	0,9051

## 7. Расчет рабочих характеристик (графики)

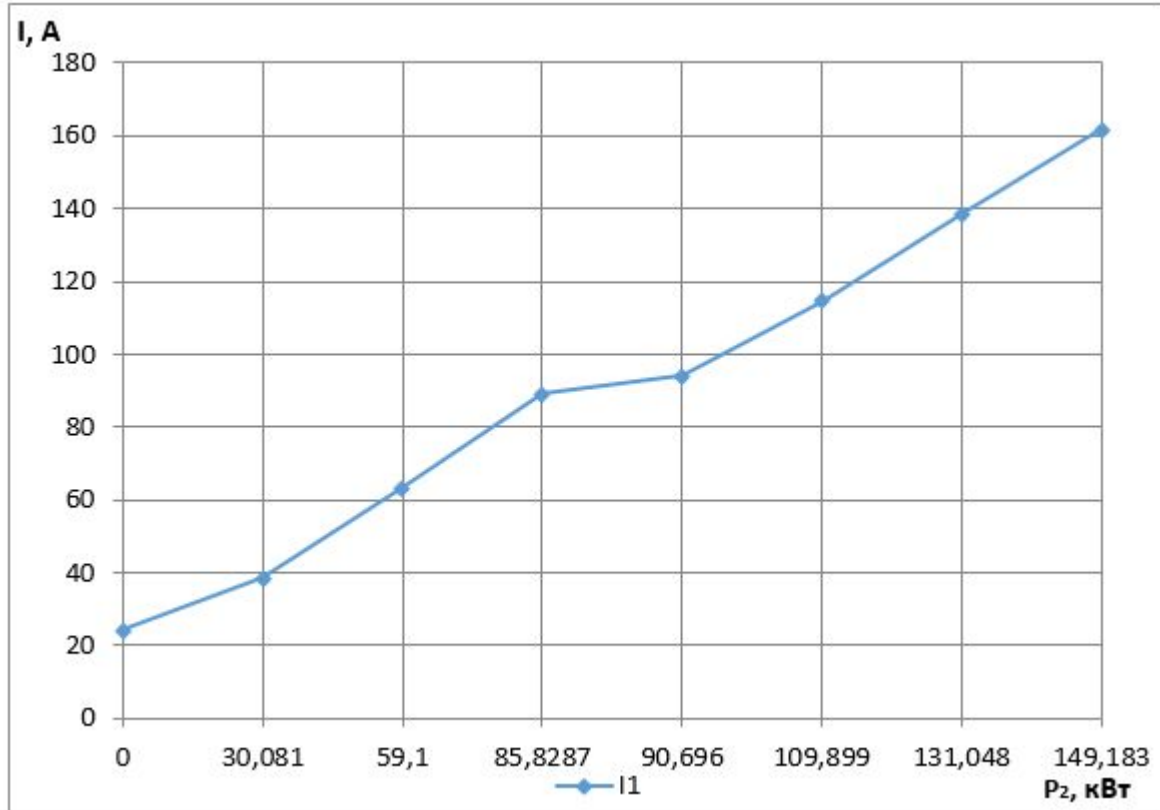


Рис. 3. Зависимость  $I_1 = f(P_2)$

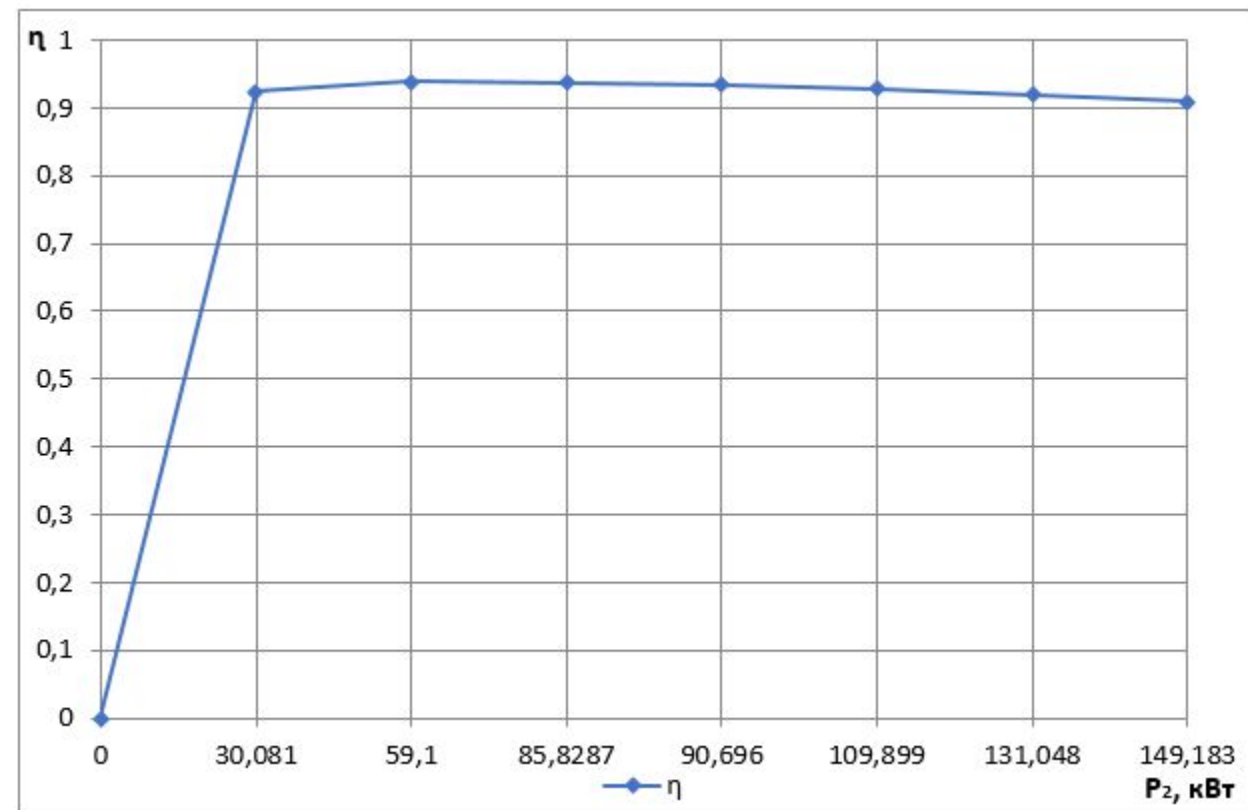


Рис. 4. Зависимость  $\eta = f(P_2)$ .



## 7. Расчет рабочих характеристик (графики)

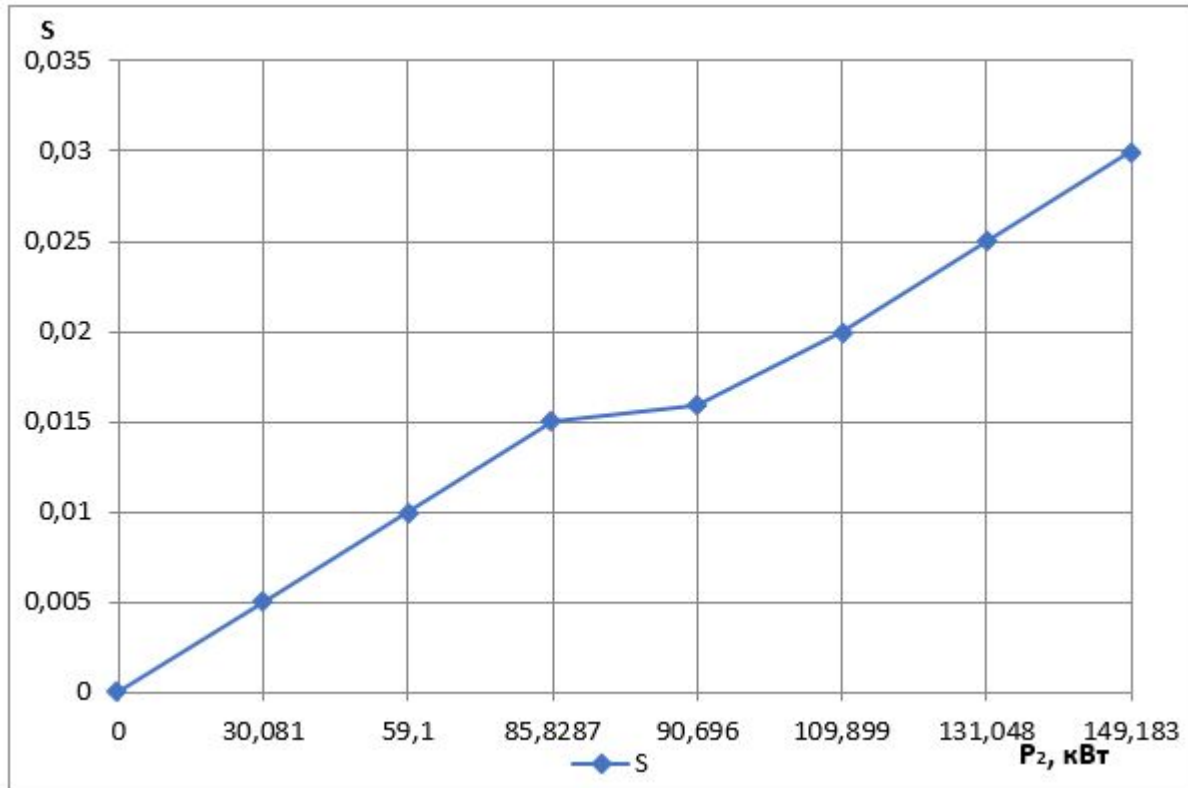


Рис. 5. Зависимость  $S = f(P_2)$

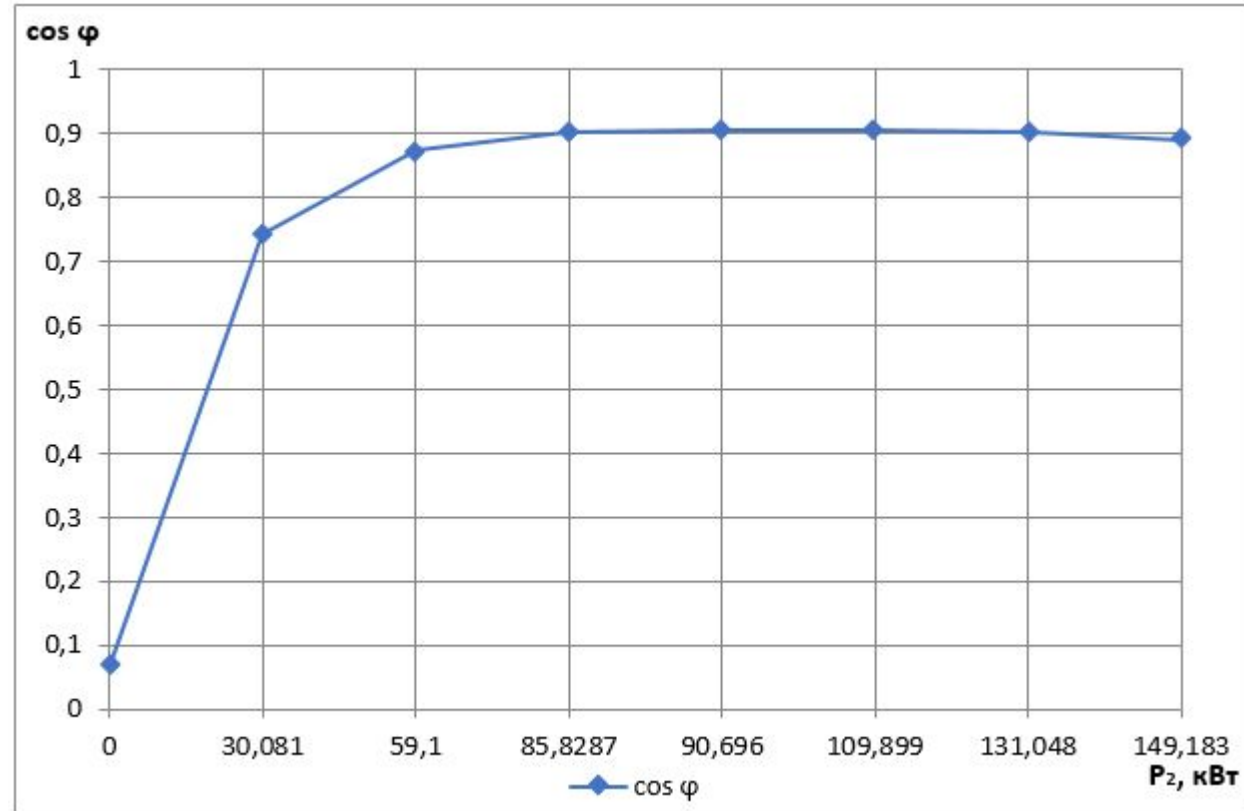


Рис. 6. Зависимость  $\cos \phi = f(P_2)$ .

# 8. Расчёт пусковых характеристик

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

№ п/п	Расчетная формула	Размер- ность	Скольжение S					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$s_{xp}=0,09$
1	$\xi = 63,61 h_c \sqrt{s}$	-	1,87	1,673	1,322	0,836	0,591	0,561
2	$\phi = \phi(\xi)$	-	0,73	0,5	0,21	0,044	0,011	0,00882
3	$h_r = \frac{h_c}{1 + \phi}$	мм	0,017	0,0196	0,024	0,0282	0,0291	0,029143
4	$k_r = \frac{q_c}{q_r}$	-	1,596	1,397	1,153	1,017	0,991	0,989
5	$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1)$	-	1,423	1,281	1,108	1,012	0,993	0,9923
6	$r'_{2\xi} = K_R \cdot r'_2$	Ом	0,0923	0,083	0,072	0,066	0,0645	0,0644
7	$k_d = \phi'(\xi)$	-	0,8	0,84	0,92	0,96	0,98	0,982
8	$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta \lambda_{\Pi 2\xi}$	-	2,76	2,809	2,905	2,954	2,978	2,98
9	$K_X = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{d2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{d2}}$	-	0,952	0,962	0,981	0,99	0,995	0,9957
10	$x'_{2\xi} = K_X \cdot x'_2$	Ом	0,3963	0,4	0,408	0,412	0,414	0,41433
11	$R_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi} \frac{r'_{2\xi}}{S}$	Ом	0,191	0,203	0,243	0,431	0,753	0,82486
12	$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} \cdot x'_{2\xi}$	Ом	0,7768	0,781	0,789	0,793	0,7949	0,79512
13	$I'_2 = \frac{U_{ном}}{\sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}}$	А	475,04	471,03	460,27	421,03	347,076	331,676
14	$I_{1\Pi} = \frac{I'_2 \cdot \sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12n})^2}}{c_{1n} \cdot x_{12n}}$	А	483,75	479,76	468,98	429,12	353,911	338,248

## 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

№ п/п	Расчетная формула	Размер- ность	Скольжение S					
			1	0,8	0,5	0,2	0,1	$S_{кр}=0,09$
1	$k_{нас}$	-	1,35	1,30	1,20	1,10	1,05	1,08
2	$F_{нсп} = 0,7 \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot u_n}{a} \left( k_{\beta'} + k_{y1} \cdot k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	5492,48	5245,34	4733,013	3969,855	3125,27	3072,294
3	$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{нсп} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	3,18	3,038	2,741	2,299	1,81	1,779
4	$k_{\delta} = f(B_{\Phi\delta})$	-	0,7	0,72	0,75	0,85	0,886	0,89
5	$c_{y1} = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	3,42	3,19	2,85	1,71	1,3	1,254
6	$\lambda_{н1нас} = \lambda_{н1} - \Delta\lambda_{н1нас}$	-	1,42	1,4296	1,446	1,513	1,543	1,5465
7	$\lambda_{д1нас} = k_{\delta} \cdot \lambda_{д1}$	-	0,823	0,847	0,882	0,9995	1,042	1,046
8	$x_{1нас} = x_1 \frac{\sum \lambda_{1нас}}{\sum \lambda_1}$	Ом	0,3223	0,3252	0,3297	0,3455	0,3517	0,3524
9	$c_{н1нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12н}}$	-	1,0148	1,0149	1,015	1,0158	1,016	1,0162
10	$c_{y2} = (t_{z2} - b_{u2}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	4,74	4,424	3,95	2,37	1,8012	1,738

11	$\lambda_{n2\xi_{нас}} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2нас}$	-	2,41	2,46	2,567	2,668	2,7234	2,73
12	$\lambda_{Д2нас} = k_{\delta} \cdot \lambda_{Д2}$	-	0,889	0,914	0,952	1,079	1,1249	1,13
13	$x'_{2\xi_{нас}} = x'_2 \frac{\sum \lambda_{2\xi_{нас}}}{\sum \lambda_2}$	Ом	0,336	0,3425	0,3544	0,3731	0,3814	0,3823
14	$R_{п.нас} = r_1 + c_{п1нас} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	0,191	0,203	0,243	0,4308	0,752	0,8243
15	$X_{п.нас} = x_{1нас} + c_{п1нас} \cdot x'_{2\xi_{нас}}$	Ом	0,663	0,673	0,689	0,7245	0,7392	0,741
16	$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}}$	А	550,624	540,792	519,7862	450,816	360,287	342,863
17	$I_{1нас} = \frac{I'_{2нас} \sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{п1нас} \cdot x_{12п}}$	А	559,127	549,3075	528,2644	458,6125	366,7918	349,1073
18	$k'_{нас} = \frac{I_{1нас}}{I_{1п}}$	-	1,156	1,145	1,126	1,069	1,0364	1,032
19	$I_{1*} = \frac{I_{1нас}}{I_{1ном}}$	-	5,98	5,876	5,65	4,905	3,9233	3,7341
20	$M_* = \left( \frac{I'_{2нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{s_{ном}}{s}$	-	0,89	0,9695	1,2395	2,1285	2,669	2,682

Критическое скольжение:  $s_{кр} = \frac{r'_{2\xi}}{\frac{x_{1нас}}{c_{1пнас}} + x'_{2\xi_{нас}}} = \frac{0,0650735}{\frac{0,34731}{1,01593} + 0,376} = 0,09$

## 8. Расчёт пусковых характеристик (графики)

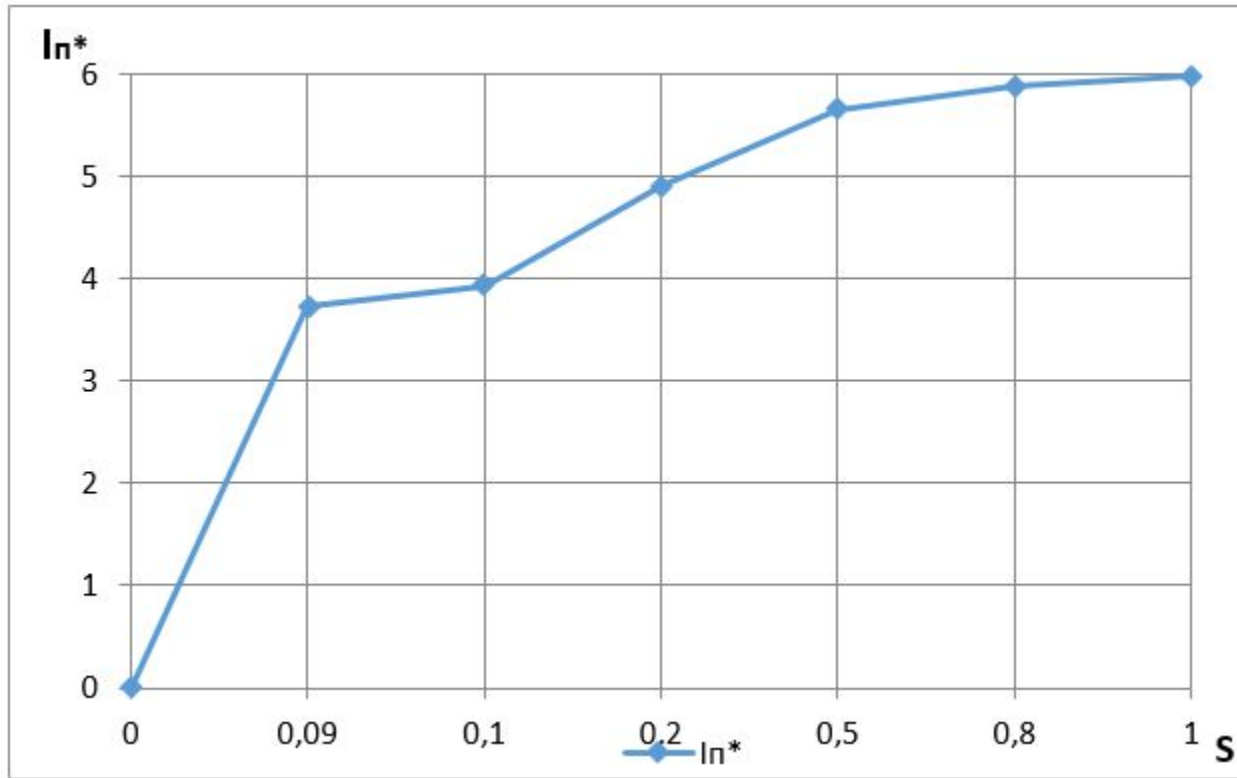


Рис. 7. – Зависимость  $I_{n*} = f(s)$

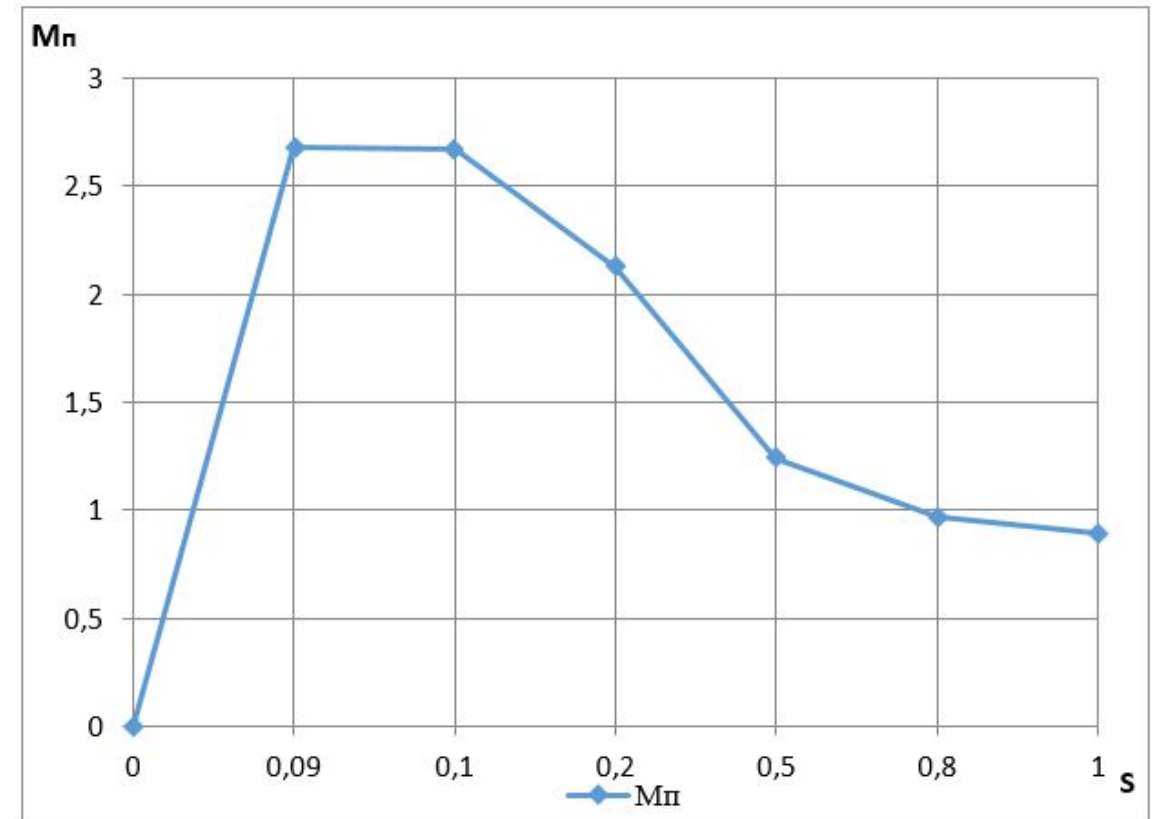


Рис. 8. – Зависимость  $M_{n*} = f(s)$

## 9. Тепловой расчёт

- Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя: 
$$\Delta v_{\text{пов}1} = K \frac{P'_{\text{э.п1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 14,7951^\circ\text{C}$$
- Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора: 
$$\Delta v_{\text{из.п1}} = \frac{P'_{\text{э.п1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{п1}} \cdot l_1} \left( \frac{b_{\text{из.п1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{1,6\lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 3,612^\circ\text{C}$$
- Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей: 
$$\Delta v_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_{\text{л1}}} \left( \frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{h_{\text{п1}}}{12\lambda'_{\text{эКВ}}} \right) = 1,1596^\circ\text{C}$$
- Превышение температуры лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя: 
$$\Delta v_{\text{пов.л1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{эл1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{выл}} \cdot a_1} = 12,251^\circ\text{C}$$
- Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя: 
$$\Delta v'_{\text{1}} = \frac{(\Delta v_{\text{пов}1} + \Delta v_{\text{из.п1}})2 \cdot l_1 + (\Delta v_{\text{из.л1}} + \Delta v_{\text{пов.л1}})2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} = 15,5463^\circ\text{C}$$
- Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой окружающей среды: 
$$\Delta v_{\text{в}} = \frac{\sum P'_{\text{в}}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{в}}} = 64,716^\circ\text{C}$$
- Среднее превышение температуры обмотки статора над окружающей средой:  $\Delta v_1 = \Delta v'_{\text{1}} + \Delta v_{\text{в}} = 80,2623^\circ\text{C}$
- Требуемый для охлаждения расход воздуха: 
$$Q_{\text{в}} = \frac{k_m \sum P'_{\text{в}}}{1100 \Delta \lambda_{\text{в}}} = 0,389 \text{ м}^3/\text{с}$$
- Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором: 
$$Q'_{\text{в}} = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,7511 \text{ м}^3/\text{с}$$
- 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. 9.

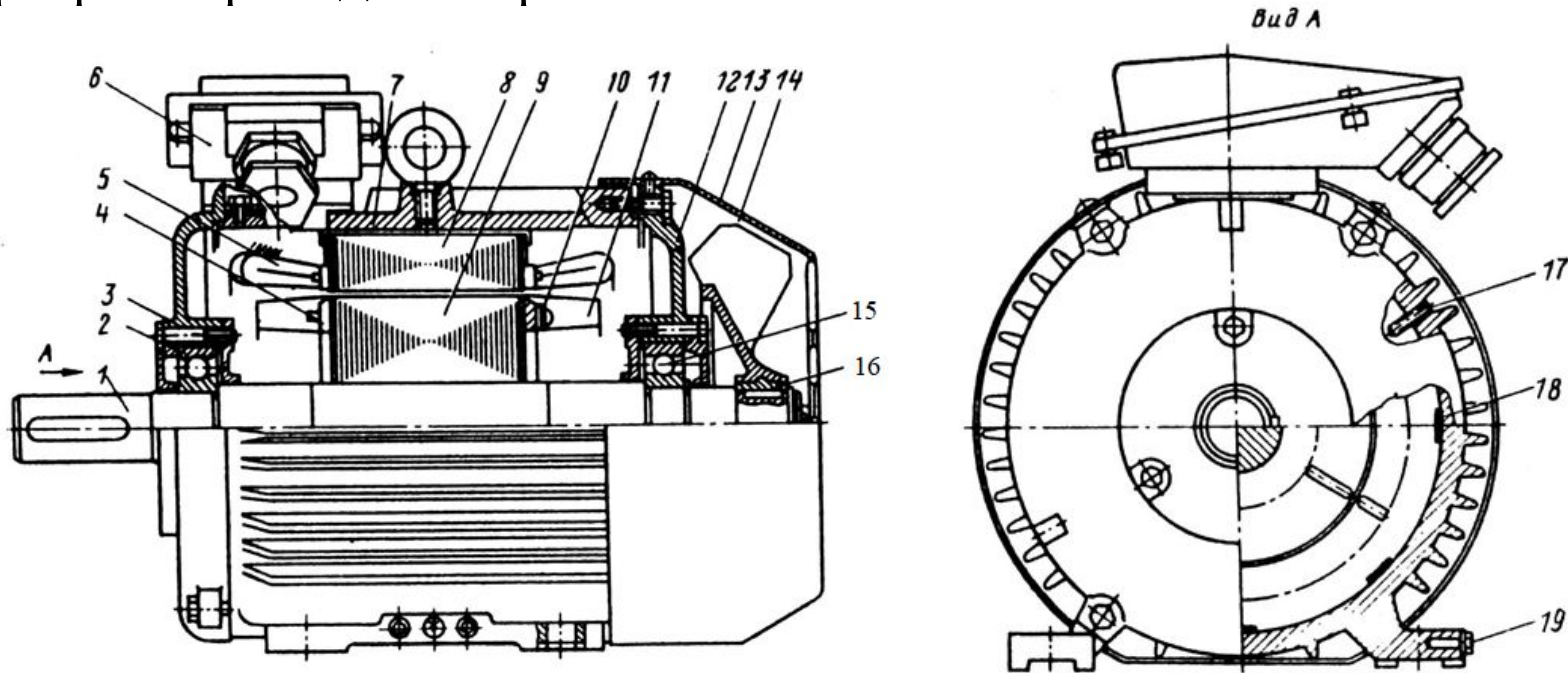


Рис. 9 – Чертёж проектируемого двигателя серии 4А

(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 лопасти ротора; 13 — кожух вентилятора; 14 — вентилятор; 16 — втулки вентилятора; 17 — стопорные винты; 18 — скобы крепления сердечника статора; 19 — болты заземления)

# Заключение

В данном курсовом проекте был спроектирован асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. В результате расчета были получены основные показатели для двигателя заданной мощности, которые удовлетворяют допустимым значениям ГОСТа. В частности, был произведен расчет главных размеров двигателя, выбрана и рассчитана обмотка статора, рассчитан ротор, произведен расчёт и проверка магнитной цепи двигателя, рассчитаны потери составлены рабочие и пусковые характеристики. В заключение был произведен тепловой и вентиляционный расчет.