

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
ГОМЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
П. О. СУХОГО

Заочный факультет

Кафедра: «Физика и электротехника»

РАСЧЕТНО-ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
к курсовому проекту  
по дисциплине «Электрические машины»  
на тему: «Проектирование трехфазного асинхронного электродвигателя»

Исполнитель: студент гр. ЗЭ – 42с  
Пархомович А.М.

Руководитель: преподаватель  
Козлов А.В.

Дата проверки: \_\_\_\_\_

Дата допуска к защите: \_\_\_\_\_

Дата защиты: \_\_\_\_\_

Оценка работы: \_\_\_\_\_

Подписи членов комиссии  
по защите курсовой работы: \_\_\_\_\_

Гомель 2021

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение</b>	<b>4</b>
<b>1.Определение главных размеров электродвигателя</b>	<b>5</b>
<b>2.Расчёт обмотки, паза и ярма статора</b>	<b>7</b>
<b>3.Расчёт обмотки, паза и ярма ротора</b>	<b>11</b>
<b>4.Расчёт магнитной цепи асинхронной машины</b>	<b>14</b>
<b>5.Определение параметров асинхронной машины для рабочего режима</b>	<b>17</b>
<b>6.Расчёт постоянных потерь мощности</b>	<b>19</b>
<b>7.Рабочие характеристики асинхронного двигателя</b>	<b>21</b>
<b>8.Пусковые характеристики асинхронного двигателя</b>	<b>23</b>
<b>Заключение</b>	<b>36</b>
<b>Список использованной литературы</b>	<b>37</b>

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.									
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата										
Разраб		Пархомович			СОДЕРЖАНИЕ					Лит.	Лист	Листов		
Пров		Козлов								У		3	1	
										ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42с				
Н. Контр.														
УТВ														

## ВВЕДЕНИЕ

Потребность в электроэнергии непрерывно растет, особенно в настоящий период в связи с ростом автоматизации и созданием технологических процессов, непосредственно использующих электрическую энергию. Электрическая энергия вырабатывается на электрических станциях из энергии органического или ядерного топлива либо энергии движущейся воды и ветра. При помощи паровых, гидравлических или другого рода турбин эти виды энергии преобразуются в механическую энергию вращения, которая затем в электрической машине, называемой генератором, преобразуется в электрическую энергию.

При использовании электрической энергии часто требуется обратное преобразование ее в механическую (привод станков, механизмов, колес и т.п.). Такое преобразование также осуществляется при помощи электрических машин, называемых двигателями.

Наряду с большой энергетикой электрические машины получили широкое применение в системах автоматического управления и бытовой технике в качестве двигателей исполнительных механизмов либо различного рода электромеханических преобразователей и датчиков.

Во всех системах большой или малой мощности, где используются электрические машины, их рабочие свойства во многом определяют поведение и свойства этих систем. Поэтому знание основ теории электрических машин необходимо каждому специалисту, работающему в любой из сфер производства, распределения или потребления электрической энергии.

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.						
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата	ВВЕДЕНИЕ				Лит.	Лист	Листов
Разраб	Пархомович								У	4	1
Пров	Козлов										
Н. Контр.											
УТВ					ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42с						

# 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ

## Исходные данные:

- Полезная мощность на валу:  $P_2 = 45 \text{ кВт}$ ;
- Число полюсов:  $2p = 2$ ;
- Номинальное напряжение:  $U_{\text{ном.ф}}/U_{\text{ном}} = 220/380 \text{ В}$ ;
- Конструктивное исполнение: IM1;
- Степень защиты: IP23;
- Способ охлаждения: IC01;
- Класс нагревостойкости: F;
- Климатическое исполнение: УЗ;
- Установочный размер: M.

## Расчёт главных размеров:

1.1.Предварительное значение высоты оси вращения (принимаем ближайшее стандартное сечение) [1 рис. П.1]:

$$h = 200 \text{ мм}$$

Тогда внешний диаметр статора [1 табл. П.1]:

$$D_a = 349 \text{ мм}$$

1.2.Коэффициент  $K_D$  [1 табл. П.2]:

$$K_D = 0,52$$

1.3.Внутренний диаметр статора

$$D = K_D \cdot D_a = 0,52 \cdot 349 = 181,5 \text{ мм}$$

1.4.Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot 181,5}{2} = 285 \text{ мм}$$

1.5.Коэффициент  $K_E$  [1 рис. П.2],  $\eta$  и  $\cos\varphi$  [1 рис. П.4]

$$K_E = 0,98; \eta = 0,88; \cos\varphi = 0,87$$

1.6.Расчетная мощность

$$P^* = \frac{P_2 \cdot K_E}{\eta_n \cdot \cos\varphi} = \frac{45000 \cdot 0,98}{0,87 \cdot 0,88} = 50602 \text{ ВА}$$

1.7.Электромагнитные нагрузки [1 рис. П.7]

$$B_\delta = 0,81 \text{ Тл}; A = 49,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

1.8.Для двигателя с высотой вращения  $h = 200 \text{ мм}$  обмотка выполняется двух-слойной, поэтому значение обмоточного коэффициента

$$k_{\text{обм1}} = 0,9$$

1.9.Предварительные значения коэффициентов  $a_\delta$  и  $k_B$

$$a_\delta = 0,64; k_B = 1,11$$

1.10.Синхронная частота вращения  $n_1$

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/мин}$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ РАЗМЕРОВ	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	5
							2
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42с	
УТВ							

1.11.Синхронная угловая частота  $\omega$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314 \text{ рад/с}$$

1.12.Расчетная длина магнитопровода

$$l_\delta = \frac{R'}{D^2 \cdot \omega \cdot k_B \cdot k_{обм1} \cdot B_\delta \cdot A} = \frac{50602}{0,1815^2 \cdot 314 \cdot 1,11 \cdot 0,9 \cdot 49,5 \cdot 10^3 \cdot 0,81} = 0,15 \text{ м}$$

1.13.Определим правильность выбора главных размеров  $l_\delta$  и  $D$

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0,15}{0,285} = 0,54$$

Данное значение лежит в допустимых пределах для АД с исполнением IP23  
[1 рис. П.8]

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						6
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

## 2.РАСЧЕТ ОБМОТКИ, ПАЗА И ЯРМА СТАТОРА

2.1.Предельные значения зубцового деления  $t_{z1}$  [1 рис. П.9]

$$t_{z1min} = 14\text{мм}; t_{z1max} = 16,7\text{ мм}$$

2.2.Предельные значения пазов статор

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1max}} = \frac{3,14 \cdot 0,1815}{0,0164} \approx 34$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1min}} = \frac{3,14 \cdot 0,1815}{0,0138} \approx 40$$

2.3.С учётом рекомендаций [1 стр.9] окончательно принимаем число пазов:

$$Z_1 = 36$$

Тогда принятое число пазов  $Z_1 = 36$  будет кратно числу фаз  $m_1$  АД ( $m_1 = 3$ ), а число пазов на полюс и фазу  $q_1$  будет целым числом:

$$\frac{Z_1}{m_1} = \frac{36}{3} = 12$$

$$q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 6$$

Обмотка статора-двухслойная

2.4. Окончательное значение зубцового деления обмотки статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1} = \frac{3,14 \cdot 0,1815}{2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 6} = 15,8\text{ мм}$$

2.5. Номинальный ток обмотки статора АД:

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{\eta \cdot \cos\varphi \cdot m_1 \cdot U_{1ном,ф}} = \frac{45000}{0,87 \cdot 0,88 \cdot 3 \cdot 220} = 89,06\text{ А}$$

2.6. Число эффективных проводников в пазу (предварительное значение) при условии, что число параллельных ветвей обмотки  $a = 1$ (параллельные ветви отсутствуют):

$$u_{\Pi} = \frac{A \cdot \pi \cdot D}{I_{1ном} \cdot Z_1} = \frac{0,1815 \cdot 3,14 \cdot 49,5 \cdot 10^3}{89,06 \cdot 36} = 8,81$$

2.7. Согласно рекомендациям [1 стр.10 и 11], принимаем число параллельных ветвей  $a$ :

$$a = 2$$

Тогда фактическое число эффективных проводников в пазу  $u_{\Pi}$  при  $a = 1$  (в нашем случае обмотка двухслойная):

$$u_{\Pi} = a \cdot u'_{\Pi} = 2 \cdot 8,81 = 17,6$$

Таким образом,  $u_{\Pi} = 18$  проводников.

2.8. Число витков в фазе обмотки статора:

$$w_1 = \frac{u_{\Pi} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{36 \cdot 18}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 54$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				РАСЧЕТ ОБМОТКИ, ПАЗА И ЯРМА СТАТОРА	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	7
							Листов
							4
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого	
УТВ						гр.3Э-42с	

2.9. Линейная нагрузка:

$$A = \frac{2 \cdot I_{\text{ном}} \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 89,06 \cdot 54 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,1815} = 50,7 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

Значение А находится в допустимых пределах [1 рис. П.7]

2.10. Для двухслойных обмоток коэффициент укорочения  $k_y < 1$ . Определим расчётное укорочение шага обмотки:

$$\beta = \frac{2 \cdot (q_1 + 1)}{3 \cdot q_1} = \frac{2 \cdot (6 + 1)}{3 \cdot 6} = 0,61$$

Тогда для 1-й гармоники по [1 рис. П.10] определим значение коэффициента укорочения:

$$k_y = 0,82$$

2.11. Коэффициент распределения  $k_p$  определим по [1 табл. П.4] (для 1-й гармоники) в зависимости от  $q_1$ :

$$k_p = 0,96$$

2.12. Значение обмоточного коэффициента для однослойной обмотки:

$$k_{\text{обм1}} = k_y \cdot k_p = 0,96 \cdot 0,82 = 0,78$$

2.13. Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{\text{ном.ф}}}{4 \cdot k_B \cdot k_{\text{обм1}} \cdot w_1 \cdot f_1} = \frac{0,98 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 0,78 \cdot 54 \cdot 50} = 22,9 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}$$

2.14. Индукция магнитного поля в воздушном зазоре:

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p}{l_\delta \cdot D} = \frac{22,9 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{0,15 \cdot 0,1815} = 0,82 \text{ Тл}$$

Полученное значение  $B_\delta$  выходит за пределы рекомендуемой области [1 рис. П.7] менее, чем на 5%, что допустимо.

2.15. Значение произведения линейной нагрузки на плотность тока  $A \cdot J$  найдём по [1 рис. П.11]:

$$A \cdot J = 320 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3$$

2.16. Плотность тока в обмотке статора (предварительное значение):

$$J_1 = \frac{A \cdot J}{A} = \frac{320 \cdot 10^9}{50,7 \cdot 10^3} = 6,32 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

2.17. Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительное значение):

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{\text{ном}}}{a \cdot J_1} = \frac{89,06}{2 \cdot 6,32 \cdot 10^6} = 7,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

При таком сечении диаметр эффективного проводника будет равен:

$$d_{\text{пр}} = \sqrt{\frac{4 \cdot q_{\text{эф}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 7,04}{3,14}} = 3,5 \text{ мм}$$

Что превышает рекомендованные значения [1 стр. 13].

2.18. В качестве обмоточного провода принимаем круглый медный изолированный провод марки ПЭТВ сечением  $q_{\text{эл}} = 1,767 \text{ мм}^2$  и диаметром  $d_{\text{эл}} = 1,5 \text{ мм}$  [1 табл. П.6]. Диаметр провода с учётом изоляции  $d_{\text{из}} = 1,585 \text{ мм}$ . С учётом рекомендаций на [1 стр. 13 и 14], принимаем число элементарных проводников  $n_{\text{эл}} = 4$ .

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						8
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

Тогда уточнённое значение площади поперечного сечения эффективного проводника:

$$q_{\text{эф}} = n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}} = 4 \cdot 1,767 = 7,07 \text{ мм}^2$$

2.19. Плотность тока в обмотке статора (уточнённое значение):

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}}} = \frac{89,06}{2 \cdot 4 \cdot 1,767} = 6,3 \text{ А/мм}^2$$

2.20. Всыпную обмотку статора с круглым обмоточным проводом будем укладывать в пазы трапецеидальной формы [1 рис. П.13, а].

2.21. Длина стали сердечника статора  $l_{\text{СТ1}}$  [1 стр. 6] и коэффициент заполнения сталью магнитопровода статора  $k_{\text{С1}}$  [1 табл. П.8]:

$$l_{\text{СТ1}} = l_{\delta} = 0,15 \text{ мм}; k_{\text{С1}} = 0,97$$

2.22. По [1 табл. П.7] предварительно принимаем значения:

- магнитной индукции в зубцах статора при постоянном сечении  $B_{\text{Z1}} = 1,9$  Тл;

- магнитной индукции в ярме статора  $B_{\text{а}} = 1,45$  Тл.

2.23. Ширина зубца статора (предварительное значение):

$$b_{\text{Z1}} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{\text{Z1}}}{l_{\text{СТ1}} \cdot k_{\text{С1}} \cdot B_{\text{Z1}}} = \frac{0,82 \cdot 0,15 \cdot 15,8 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 1,9 \cdot 0,97} = 7,04 \text{ мм}$$

2.24. Высота ярма статора:

$$h_{\text{а}} = \frac{\Phi}{2 \cdot l_{\text{СТ1}} \cdot k_{\text{С1}} \cdot B_{\text{а}}} = \frac{22,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,15 \cdot 0,97 \cdot 1,45} = 52,9 \text{ мм}$$

2.25. Размеры паза в штампе определим с учётом приведённых на [1 стр. 15 и 16] рекомендаций и рассчитаем по соответствующим выражениям [1 рис. 2.1]:

- ширина шлица паза  $b_{\text{Ш1}} = 4 \text{ мм}$  [1 табл. П.10];
- высота шлица паза  $h_{\text{Ш1}} = 1 \text{ мм}$  [1 стр. 15];
- угол наклона грани клиновой части паза  $\beta_{\text{К}} = 45^\circ$  [1 стр. 15];
- высота паза:

$$h_{\text{П1}} = \frac{D_{\text{а}} - D}{2} - h_{\text{а}} = \frac{0,349 - 0,1815}{2} - 0,0529 = 30,9 \text{ мм}$$

- меньшая ширина паза:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{\text{Ш1}} - b_{\text{Ш1}}) - Z_1 \cdot b_{\text{Z1}}}{Z_1 - \pi} = \frac{3,14 \cdot (181,5 + 2 \cdot 1 - 4) - 36 \cdot 7,04}{36 - 3,14} = 9,4 \text{ мм}$$

- большая ширина паза:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{\text{П1}})}{Z_1} - b_{\text{Z1}} = \frac{3,14 \cdot (181,5 + 2 \cdot 30,9)}{36} - 7,04 = 14,2 \text{ мм}$$

- высота клиновой части паза:

$$h_{\text{К}} = \frac{b_1 - b_{\text{Ш1}}}{2} = \frac{9,4 - 4}{2} = 2,7 \text{ мм}$$

- высота паза без учёта высоты клиновой части и высоты шлица

$$h_{\text{П.К}} = h_{\text{П1}} - \left( h_{\text{Ш1}} + \frac{b_1 - b_{\text{Ш1}}}{2} \right) = 30,9 - \left( 1 + \frac{9,4 - 4}{2} \right) = 27,2 \text{ мм}$$

2.26. Припуски на сборку по ширине  $\Delta b_{\text{П1}}$  и высоте  $\Delta h_{\text{П1}}$  паза [1 табл. П.9]:

$$\Delta b_{\text{П1}} = 0,2 \text{ мм}; \Delta h_{\text{П1}} = 0,2 \text{ мм};$$



## 2.27. Размеры паза “в свету”:

- высота паза:

$$h'_{п1} = h_{п1} - \Delta h_{п1} = 30,9 - 0,2 = 30,7 \text{ мм}$$

- высота паза без учёта высоты клиновой части и высоты шлица:

$$h'_{п.к} = h_{п.к} - \Delta h_{п1} = 27,2 - 0,2 = 27 \text{ мм}$$

- меньшая ширина паза:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_{п1} = 9,4 - 0,2 = 9,2 \text{ мм}$$

- большая ширина паза:

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_{п1} = 14,2 - 0,2 = 14 \text{ мм}$$

## 2.28. Односторонняя толщина изоляции в пазу [1 табл. П.11]:

$$b_{из} = 0,4 \text{ мм}$$

## 2.29. Площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу:

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2 \cdot h_{п1} + b_1 + b_2) = 0,4 \cdot (2 \cdot 30,7 + 9,4 + 14,2) = 34,16 \text{ мм}^2$$

## 2.30. Площадь поперечного сечения паза, остающаяся свободной для размещения проводников обмотки:

$$S'_{п} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{п.к} - (S_{из}) = \frac{9,2 + 14}{2} \cdot 27 - (34,16) = 265,16 \text{ мм}^2$$

## 2.31. Коэффициент заполнения паза статора:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot n_{эл} \cdot u_{п}}{S'_{п}} = \frac{1,585^2 \cdot 4 \cdot 18}{265,16} = 0,69$$

Что является допустимым значением [1 стр. 18] и говорит о том, что расчёт обмотки статора и выбор главных размеров АД были выполнены, верно.

## 2.32. Уточняем среднее значение ширины зубца статора $b_{z1}$ , приняв его в качестве расчётного:

$$b'_{z1} = \pi \cdot \frac{D + 2 \cdot (h_{ш1} + h_K)}{Z_1} - b_1 = 3,14 \cdot \frac{181,5 + 2 \cdot (1 + 2,7)}{36} - 9,2 = 7,03 \text{ мм}$$

$$b''_{z1} = \pi \cdot \frac{D + 2 \cdot h_{п1}}{Z_1} - b_2 = 3,14 \cdot \frac{181,5 + 2 \cdot 30,7}{36} - 14,2 = 7,03 \text{ мм}$$

Значения  $b'_{z1} = b''_{z1}$ , поэтому  $b_{z1} = b'_{z1} = b''_{z1} = 7,03 \text{ мм}$ .

## 2.33. Пользуясь рекомендациями на [1 стр. 19 и П.14] определим величину воздушного зазора между статором и ротором АД:

$$\sigma = 1 \text{ мм}$$

### 3.РАСЧЁТ ОБМОТКИ, ПАЗА И ЯРМА РОТОРА

3.1. Число пазов ротора [1 по табл. П.12]:

$$Z_2 = 28$$

3.2. Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2 \cdot \sigma = 181,5 - 2 \cdot 1 = 179,5 \text{ мм}$$

3.3. Длина сердечника ротора [1 стр. 7-8]:

$$l_{CT2} = l_2 = l_{CT1} = l_\delta = 0,13 \text{ мм}$$

3.4. Зубцовое деление ротора:

$$t_{Z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 0,1815}{28} = 20,14 \text{ мм}$$

3.5. Сердечник ротора двигателя выполнен с непосредственной посадкой на вал [1 стр. 20-21], поэтому внутренний диаметр сердечника ротора определим по выражению:

$$D_j = D_B = k_B \cdot D_a = 0,23 \cdot 349 = 80 \text{ мм}$$

где:  $D_B$  – диаметр вала;

$k_B = 0,23$  – коэффициент, выбранный по [1 табл. П.13]

3.6. Коэффициент  $k_i$ , учитывающий влияние тока намагничивания на отношение токов  $\frac{I_2}{I_1}$  (предварительное значение):

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,88 = 0,9$$

3.7. Высота оси АД 180 мм, поэтому ротор выполняется без скоса пазов [1 стр. 20-22].

• коэффициент скоса:

$$k_{CK} = 1$$

3.8. Коэффициент приведения токов:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{OБМ1}}{Z_2 \cdot k_{CK}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 54 \cdot 0,78}{28 \cdot 1} = 9,06$$

3.9. Ток в обмотке ротора (предварительное значение):

$$I_2 = k_i \cdot I_{1НОМ} \cdot v_i = 9,06 \cdot 89,06 \cdot 0,9 = 729,6 \text{ А}$$

3.10. В качестве обмотки ротора принимаем литую конструкцию с алюминиевыми стержнями и короткозамкнутыми кольцами [1 стр.20].

Задаёмся плотностью тока в алюминиевых стержнях ротора [1 стр.22]:

$$J_2 = 3,2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

3.11. Площадь поперечного сечения стержня (предварительное значение):

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{729,6}{3,2} = 228,01 \text{ мм}^2$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				Расчет обмотки, паза и ярма ротора	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	11
							2
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42	
УТВ							

3.12. В данном двигателе применяются трапецеидальные закрытые пазы [1 рис. 3.2, стр. 23]. Принимаем:

- ширина шлица паза  $b_{ш2} = 1,5\text{мм}$  [1 стр. 23];
- высота шлица паза  $h_{ш2} = 0,7\text{мм}$  [1 стр. 23];
- высота перемычки над пазом  $h'_{ш2} = 1\text{мм}$  [1 стр. 23];

По [1 табл. П.7] принимаем значение магнитной индукции в зубцах ротора при постоянном сечении  $B_{Z2} = 2\text{ Тл}$ .

3.13. Допустимая ширина зубца ротора:

$$b_{Z2.Д} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{Z2}}{l_{CT2} \cdot k_{C2} \cdot B_{Z2}} = \frac{0,82 \cdot 0,15 \cdot 20,14 \cdot 10^{-3}}{0,15 \cdot 2 \cdot 0,97} = 8,51\text{ мм}$$

где  $k_{C2} = 0,97$  – коэффициент заполнения сталью магнитопровода ротора [1 табл. П.8]

3.14. Размеры паза ротора:

- диаметр закругления верхней части паза:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш2} - 2 \cdot h'_{ш2}) - Z_2 \cdot b_{Z2.Д}}{Z_2 + \pi} = \frac{3,14 \cdot (179,5 - 2 \cdot 0,7 - 2 \cdot 1) - 28 \cdot 8,51}{28 + 3,14} = 10,1\text{мм}$$

- диаметр закругления нижней части паза:

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_C}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{10,1^2 \left(\frac{28}{3,14} + \frac{3,14}{2}\right) - 4 \cdot 228,01}{\frac{28}{3,14} + \frac{3,14}{2}}} = 4,6\text{ мм}$$

- расстояние между центрами закруглений верхней и нижней частей паза:

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (10,1 - 4,6) \cdot \frac{28}{2 \cdot 3,14} = 24,5\text{мм}$$

3.15. Округлим до десятых и примем окончательные значения  $b_1$ ,  $b_2$  и  $h_1$ :

$$b_1 = 10,1\text{ мм}; b_2 = 4,6\text{мм}; h_1 = 24,5\text{ мм}$$

3.16. Полная высота паза ротора:

$$h_{п2} = h_1 + h_{ш2} + h'_{ш2} + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} = 24,5 + 0,7 + 1 + \frac{10,1}{2} + \frac{4,6}{2} = 33,6\text{ мм}$$

3.17. Уточняем ширину зубцов ротора:

$$b'_{Z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot (h_{ш2} + h'_{ш2}) - b_1}{Z_2} - b_1 = 3,14 \cdot \frac{179,5 - 2 \cdot (0,7 + 1) - 10,1}{28} - 10,1 = 8,5\text{ мм}$$

$$b''_{Z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_{п2} + b_2}{Z_2} - b_2 = 3,14 \cdot \frac{179,5 - 2 \cdot 33,6 + 4,6}{28} - 4,6 = 8,5\text{ мм}$$

3.18. Уточнённое значение ширины зубца ротора:

$$b_{Z2} = b'_{Z2} = b''_{Z2} = 8,5\text{ мм}$$

3.19. Уточнённое значение площади поперечного сечения стержня:

$$q_C = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 = \frac{3,14}{8} \cdot (10,1^2 + 4,6^2) + \frac{1}{2} \cdot (10,1 + 4,6) \cdot 24,5 = 228,4\text{ мм}^2$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						12
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

3.20. Плотность тока в стержне ротора (уточнённое значение):

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{729,6}{228,4} = 3,19 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

3.21. Коэффициент  $\Delta$  для расчёта тока короткозамкнутого кольца:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3,14 \cdot 1}{28} = 0,22$$

3.22. Ток короткозамкнутого кольца ротора:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{729,6}{0,22} = 3258,36 \text{ А}$$

3.23. Плотность тока в короткозамкнутых кольцах принимаем согласно рекомендациям на [1 стр. 27]:

$$J_{\text{кл}} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 3,19 \cdot 10^6 = 2,71 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

3.24. Площадь поперечного сечения короткозамкнутого кольца:

$$q_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = \frac{3258,36}{2,71 \cdot 10^6} = 1200,2 \text{ мм}^2$$

3.25. Размеры короткозамкнутых колец [1 рис. 3.3]:

- высота кольца:

$$h_{\text{кл}} = 1,2 \cdot h_{\text{п2}} = 1,2 \cdot 33,6 = 42 \text{ мм}$$

- ширина кольца:

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{h_{\text{кл}}} = \frac{1200,2}{42} = 28,6 \text{ мм}$$

- средний диаметр кольца:

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 179,5 - 42 = 137,5 \text{ мм}$$

3.26. Расчётное уточнённое значение площади поперечного сечения короткозамкнутого кольца:

$$q_{\text{кл}} = h_{\text{кл}} \cdot b_{\text{кл}} = 42 \cdot 28,6 = 1201,2 \text{ мм}^2$$

#### 4. РАСЧЁТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ

4.1. Марку стали магнитопровода принимаем согласно рекомендациям [1 табл.П.14]: сталь марки 2013

4.2. Коэффициент  $\gamma_1$  для расчёта магнитного напряжения воздушного зазора:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{ш1}}{\sigma}\right)^2}{5 + \frac{b_{ш1}}{\sigma}} = \frac{\left(\frac{4}{1}\right)^2}{5 + \frac{4}{1}} = 1,78$$

4.3. Коэффициент  $k_\sigma$  для расчёта магнитного напряжения воздушного зазора:

$$k_\sigma = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \sigma} = \frac{15,84}{15,84 - 1,78 \cdot 1} = 1,13$$

4.4. Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_\sigma = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \sigma \cdot k_\sigma = \frac{2}{12,56 \cdot 10^{-7}} \cdot 0,82 \cdot 1,13 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1469,2 \text{ А}$$

где  $\mu_0 = 12,56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная проницаемость [1 стр. 28].

4.5. Расчётная высота зубца статора:

$$h_{z1} = h_{п1} = 30,9 \text{ мм}$$

4.6. Расчётная индукция в зубцах статора:

$$B'_{z1} = \frac{B_\delta \cdot l_\delta \cdot t_{z1}}{l_{ст1} \cdot k_{с1} \cdot b_{z1}} = \frac{0,82 \cdot 0,15 \cdot 15,84}{0,15 \cdot 7,03 \cdot 0,97} = 1,905 \text{ Тл}$$

4.7. Так как расчётная индукция  $B'_{z1} = 1,905 \text{ Тл} > 1,8 \text{ Тл}$ , то необходимо учесть ответвление потока в паз и найти действительную индукцию в зубце статора  $B_{z1}$ . Для этого:

$$k_{п1} = \frac{b_{п1} \cdot l_\delta \cdot t_{z1}}{l_{ст1} \cdot k_{с1} \cdot b_{z1}} = \frac{11,8 \cdot 0,15 \cdot 15,84}{0,15 \cdot 7,03 \cdot 0,97} = 1,72$$

Где:

$$b_{п1} = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{9,4 + 14,2}{2} = 11,8 \text{ мм}$$

• зададимся значением действительной индукции  $B_{z1} = 1,9 \text{ Тл}$  и определим по [1 табл. П.17] напряженность магнитного поля в сечении зубца статора:

$$H_{z1} = 2070 \text{ А/м}^2$$

• проверим выполнение условия:

$$B_{z1} = B'_{z1} - H_{z1} \cdot k_{п1} \cdot \mu_0$$

$$1,9 = 1,905 - 2070 \cdot 1,72 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} = 1,9$$

Условие выполняется

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	14
							Листов
							3
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого	
Утв						гр.3Э-42с	

4.8. Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$F_{Z1} = 2 \cdot H_{Z1} \cdot h_{Z1} = 2 \cdot 2070 \cdot 30,9 \cdot 10^{-3} = 127,93 \text{ А}$$

4.9. Расчётная высота зубца ротора:

$$h_{Z2} = h_{п2} - 0,1 \cdot b_2 = 33,6 - 0,1 \cdot 4,6 = 33,14 \text{ мм}$$

4.10. Расчётная индукция в зубцах ротора:

$$B'_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{Z2}}{l_{CT2} \cdot k_{C2} \cdot b_{Z2}} = \frac{0,82 \cdot 0,15 \cdot 20,14}{0,15 \cdot 8,5 \cdot 0,97} = 2,05 \text{ Тл}$$

Так как расчётная индукция  $B'_{Z2}=2,05 \text{ Тл} > 1,8 \text{ Тл}$ , то необходимо учесть от-  
ветвление потока в паз и найти действительную индукцию в зубце ротора  
 $B_{Z1}$ . Для этого:

$$k_{п2} = \frac{b_{п2} \cdot l_{\delta} \cdot t_{Z2}}{l_{CT2} \cdot k_{C2} \cdot b_{Z2}} = \frac{7,35 \cdot 0,15 \cdot 20,14}{0,15 \cdot 8,5 \cdot 0,97} = 1,22$$

Где:

$$b_{п2} = \frac{b_1 + b_2}{2} = \frac{10,1 + 4,6}{2} = 7,35 \text{ мм}$$

• зададимся значением действительной индукции  $B_{Z2} = 2 \text{ Тл}$  и определим  
по [1 табл. П.17] напряженность магнитного поля в сечении зубца статора:

$$H_{Z2} = 3150 \text{ А/м}^2$$

• проверим выполнение условия:

$$B_{Z2} = B'_{Z2} - H_{Z2} \cdot k_{п2} \cdot \mu_0$$
$$2 = 2,05 - 3150 \cdot 1,22 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7} = 2$$

Условие выполняется

4.11. Напряженность магнитного поля в сечении зубца ротора [1 табл. П.1.7]:

$$H_{Z2} = 3150 \text{ А/м}^2 \quad B_{Z2} = 2 \text{ Тл}$$

4.12. Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$F_{Z2} = 2 \cdot H_{Z2} \cdot h_{Z2} = 2 \cdot 3150 \cdot 33,14 \cdot 10^{-3} = 208,78 \text{ А}$$

4.13. Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z2} + F_{Z1}}{F_{\sigma}} = 1 + \frac{208,78 + 127,93}{1469,2} = 1,23$$

Значение коэффициента насыщения зубцовой зоны  $k_Z$  находится в допусти-  
мых пределах, что предварительно говорит о правильности выбранных раз-  
мерных соотношений и обмоточных данных АД [1 стр. 31]

4.14. Длина средней силовой линии магнитного поля в ярме статора:

$$L_a = \pi \cdot \frac{D_a - h_a}{2 \cdot p} = 3,14 \cdot \frac{0,349 - 0,0529}{2} = 0,47 \text{ м}$$

4.15. Проектируемый АД имеет длину сердечника статора  $l_{CT1}=150 \text{ мм} < 300$   
мм, поэтому вентиляционные каналы в статоре отсутствуют [1 стр. 31]. В  
этом случае расчётная высота ярма статора:

$$h'_a = h_a = 52,9 \text{ мм}$$

4.16. Индукция в ярме статора:

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						15
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{CT1} \cdot k_{C1}} = \frac{22,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0529 \cdot 0,15 \cdot 0,97} = 1,45 \text{ Тл}$$

4.17. Напряжённость поля ярма статора при индукции  $B_a$  [1 табл.П.1.6]:

$$H_a = 460 \text{ А/м}^2$$

4.18. Магнитное напряжение ярма статора:

$$F_a = H_a \cdot L_a = 460 \cdot 0,529 = 213,98 \text{ А}$$

4.19. Сердечник ротора проектируемого АД является сердечником с непосредственной посадкой на вал. Определим значение следующего выражения и оценим выполнения условия:

$$0,75 \cdot \left( \frac{D_a}{2} - h_{П2} \right) = 0,75 \cdot \left( \frac{0,349}{2} - 0,0336 \right) = 0,135 > D_B = 0,08$$

Поэтому для АД с  $2p=2$  расчётная высота ярма ротора определится по выражению:

$$h_j = \frac{D_2 - D_B}{2} - h_{П2} = \frac{0,1795 - 0,08}{2} - 0,0336 = 15,99 \text{ мм}$$

4.20. Длина средней силовой линии магнитного поля в ярме ротора:

$$L_j = 2 \cdot h_j = 2 \cdot 15,99 = 31,98 \text{ мм}$$

4.21. Индукция в ярме ротора:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot l_{CT2} \cdot k_{C2}} = \frac{22,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,01599 \cdot 0,15 \cdot 0,97} = 1,46 \text{ Тл}$$

4.22. Напряжённость поля ярма ротора при индукции  $B_j$  [1 табл.П.16]:

$$H_j = 460 \text{ А/м}^2$$

4.23. Магнитное напряжение ярма ротора:

$$F_j = H_j \cdot L_j = 460 \cdot 0,03198 = 13,75 \text{ А}$$

4.24. Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи на одну пару полюсов:

$$F_{\Sigma} = F_j + F_a + F_{Z2} + F_{Z1} + F_{\sigma} = 13,75 + 213,98 + 208,78 + 127,93 + 1469,2 = 2033,6 \text{ А}$$

4.25. Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\mu} = \frac{F_{\Sigma}}{F_{\sigma}} = \frac{2033,6}{1469,2} = 1,38$$

4.26. Намагничивающий ток АД:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\Sigma}}{0,9 \cdot m_1 \cdot k_{обм1} \cdot w_1} = \frac{1 \cdot 1469,2}{0,9 \cdot 3 \cdot 0,78 \cdot 54} = 17,8 \text{ А}$$

4.27. Относительное значение намагничивающего тока:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}} = \frac{17,8}{89,06} = 0,2$$

Значение  $I_{\mu}^*$  лежит в допустимых пределах, что говорит о корректном выборе размеров двигателя и параметров его обмоток [1 стр. 35]

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						16
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

## 5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ ДЛЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА

5.1. Длина пазовой части катушки обмотки статора:

$$l_{п1} = l_1 = l_2 = 0,15 \text{ м}$$

5.2. Средняя ширина катушки обмотки статора:

$$b_{кт} = \frac{\pi \cdot (D + h_{п1})}{2 \cdot p} \cdot \beta = \frac{3,14 \cdot (0,1815 + 0,0309)}{2} \cdot 0,61 = 0,2 \text{ м}$$

5.3. Коэффициенты  $k_l$  и  $k_{выл}$  для расчёта длины лобовой части катушки обмотки статора [1 табл. П.24,] (обмотка всыпная с неизолированными лобовыми частями):

$$k_l = 1,2 ; \quad k_{выл} = 0,26$$

5.4. Длина вылета прямолинейной части катушек обмотки статора из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части ([1 стр. 37] для случая, когда всыпная обмотка укладывается в пазы до запрессовки сердечника в корпус):

$$B = 0,01 \text{ м}$$

5.5. Длина изогнутой лобовой части катушки обмотки статора:

$$l_{л1} = k_l \cdot b_{кт} + 2 \cdot B = 1,4 \cdot 0,2 + 2 \cdot 0,01 = 0,26 \text{ м}$$

5.6. Длина вылета лобовой части катушки обмотки статора:

$$l_{выл1} = k_{выл} \cdot b_{кт} + B = 0,5 \cdot 0,2 + 0,01 = 0,063 \text{ м}$$

5.7. Средняя длина витка обмотки фазы статора:

$$l_{ср1} = 2 \cdot (l_{п1} + l_{л1}) = 2 \cdot (0,15 + 0,26) = 0,84 \text{ м}$$

5.8. Длина проводников фазы обмотки статора:

$$L_1 = l_{ср1} \cdot w_1 = 0,84 \cdot 54 = 42,26 \text{ м}$$

5.9. Расчётная температура  $v_{расч}$  и удельное сопротивление материала проводника медной обмотки статора  $p_m$  при расчётной температуре ([1 стр. 37 и табл. П.26]):

$$v_{расч} = 75^{\circ}\text{C} \text{ (для класса изоляции В); } p_m = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

5.10. Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = p_m \cdot k_R \cdot \frac{L_1}{a \cdot q_{\text{ЭФ}}} = 1 \cdot \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{42,26}{2 \cdot 7,07 \cdot 10^{-6}} = 0,068 \text{ Ом}$$

где:  $k_R = 1$  [1 стр. 38]

5.11. Относительное значение активного сопротивления обмотки статора:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном.ф}} = 0,068 \cdot \frac{89,06}{220} = 0,027 \text{ о. е.}$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАШИНЫ ДЛЯ РАБОЧЕГО РЕЖИМА	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	17
							3
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42с	
УТВ							



5.12. Удельное сопротивление материала алюминиевой литой обмотки ротора и короткозамкнутого кольца  $p_a$  при расчётной температуре  $v_{расч} = 75^{\circ}\text{C}$  [1 стр. 37 и табл. П.26]:

$$p_a = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

5.13. Активное сопротивление алюминиевого стержня ротора:

$$r_c = p_a \cdot k_R \cdot \frac{l_2}{q_c} = 1 \cdot \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,13}{228,4 \cdot 10^{-6}} = 32,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

где:  $k_R = 1$  [1 стр. 38]

5.14. Активное сопротивление алюминиевого короткозамкнутого кольца:

$$r_{кл} = p_a \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{q_{кл} \cdot Z_2} = \frac{1}{21,5} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,1375}{1201,2 \cdot 28 \cdot 10^{-6}} = 0,63 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

5.15. Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 32,9 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 0,63 \cdot 10^{-6}}{0,22^2} = 57,98 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

5.16. Активное сопротивление ротора, приведённое к числу витков обмотки статора:

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{обм1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2} = 57,98 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (54 \cdot 0,78)^2}{28 \cdot 1^2} = 0,044 \text{ Ом}$$

5.17. Относительное значение приведённого активного сопротивления ротора:

$$r_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном.ф}} = 0,044 \cdot \frac{89,06}{220} = 0,02 \text{ о.е.}$$

5.18. Радиальные вентиляционные каналы в данном АД отсутствуют, поэтому расчётная длина магнитопровода статора (при  $n_k = 0$ ):

$$l_{\sigma} = l_1 = 0,15 \text{ м}$$

5.19. Коэффициенты  $k_{\beta}$  и  $k'_{\beta}$ :

$$k'_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3\beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,78) = 0,67$$

$$k_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3k'_{\beta}) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,67) = 0,75$$

5.20. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора:

$$\begin{aligned} \lambda_{п1} &= \frac{h_2}{3 \cdot b_1} \cdot k_{\beta} + \left( \frac{h_1}{b_1} + \frac{3h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} \right) \cdot k'_{\beta} = \\ &= \frac{26,4}{3 \cdot 9,4} \cdot 0,75 + \left( \frac{0}{9,5} + \frac{3 \cdot 1,7}{9,5 + 2 \cdot 4} + \frac{1}{4} \right) \cdot 0,67 = 1,17 \end{aligned}$$

где  $h_1 = 0$  (проводники закреплены пазовой крышкой), и  $h_2 = h_{пк} - 2 \cdot b_{из} = 27,2 - 2 \cdot 0,4 = 26,4 \text{ мм}$

5.21. Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния статора:

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q_1}{l_{\sigma}} \cdot (l_{л1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{6}{0,15} \cdot (0,26 - 0,64 \cdot 0,78 \cdot 0,285) = 2,02$$

5.22. Коэффициент  $\xi$  (паз статора – полузакрытый, скос пазов ротора  $\beta_{ск} = 0$ )

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						18
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

$$\xi = 2 \cdot k'_{\text{ск}} \cdot k_{\beta} - k_{\text{обм1}}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_{\text{ск}}^2) =$$

$$= 2 \cdot 1,5 \cdot 0,75 - 0,78^2 \cdot \left(\frac{20,14}{15,81}\right)^2 \cdot (1 + 0^2) = 1,26$$

где  $k'_{\text{ск}} = 1,5$  [1 рис. П.16]

5.23. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора:

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \sigma \cdot k_{\sigma}} \cdot \xi = \frac{15,81}{12 \cdot 1 \cdot 1,13} \cdot 1,26 = 1,47$$

5.24. Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l'_{\sigma}}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{п1}}) =$$

$$= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{54}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,15}{1 \cdot 6} \cdot (2,02 + 1,26 + 1,47) = 0,28 \text{ Ом}$$

5.25. Относительное значение индуктивного сопротивления фазы статора:

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном.ф}}} = 0,28 \cdot \frac{89,06}{220} = 0,11 \text{ о. е.}$$

5.26. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния короткозамкнутого ротора [1 стр. стр. 41-42]:

$$\lambda_{\text{п2}} = \left[ \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right) + 0,66 - \frac{b_{\text{ш2}}}{2 \cdot b_1} \right] \cdot k_{\text{д}} + \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} + 1,12 \cdot 10^6 \frac{h'_{\text{ш2}}}{I_2} =$$

$$= \left[ \frac{26,34}{3 \cdot 10,1} \cdot \left( 1 - \frac{3,14 \cdot 10,1^2}{8 \cdot 228,4} \right) + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 10,1} \right] \cdot 1 + \frac{0,7}{1,5} + 1,12$$

$$\cdot 10^6 \frac{1}{729,64} = 3,17$$

где

$$h_0 = h_1 + \frac{b_2}{2} - 0,1 \cdot b_2 = 24,5 + \frac{4,6}{2} - 0,1 \cdot 4,6 = 26,34 \text{ мм}$$

5.27. Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния ротора:

$$\lambda_{\text{л2}} = \frac{2,3 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot l'_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \lg \cdot \frac{4,7 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{h_{\text{кл}} + 2 \cdot b_{\text{кл}}} = \frac{2,3 \cdot 137,5}{28 \cdot 0,15 \cdot 0,22^2} \cdot \lg \cdot \frac{4,7 \cdot 137,5}{42 + 2 \cdot 28,6} = 1,45$$

5.28. Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки ротора:

$$\lambda_{\text{д2}} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \sigma \cdot k_{\sigma}} \cdot \xi = \frac{20,84}{12 \cdot 1 \cdot 1,16} \cdot 1 = 1,45$$

Так как  $\frac{Z_2}{p} = \frac{28}{1} = 28 < 10$ , то  $\xi = 1$

5.29. Коэффициент проводимости скока:

$$\lambda_{\text{ск}} = \frac{t_{z2} \cdot \beta_{\text{ск}}^2}{12 \cdot k_{\mu} \cdot k_{\sigma}} = \frac{20,84 \cdot 0^2}{12 \cdot 1,16 \cdot 1,38} = 0$$

5.30. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l'_{\sigma} \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{ск}}) =$$

$$= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,1 \cdot 10^{-6} \cdot (0 + 1,45 + 1,45 + 3,17) = 272 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						19
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

5.31. Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора, приведённое к числу витков обмотки статора:

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{обм1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}^2} = 272 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (54 \cdot 0,78)^2}{28 \cdot 1^2} = 0,27 \text{ Ом}$$

5.32. Относительное значение индуктивного сопротивления фазы ротора:

$$x_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном.ф}} = 0,27 \cdot \frac{89,06}{220} = 0,11 \text{ о. е.}$$

## 6. РАСЧЕТ ПОСТОЯННЫХ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ

6.1. Удельные потери мощности в стали марки 2013 при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц [1 табл. П.27]:

$$p_{1,0/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$$

6.2. Масса стали ярма статора:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{CT1} \cdot k_{C1} \cdot \gamma_c = 3,14 \cdot (0,349 - 0,0529) \cdot 0,0529 \cdot 0,15 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 57,48 \text{ кг}$$

Где  $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  – удельная масса стали [1 стр. 44]

6.3. Масса стали зубцов статора:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_{CT1} \cdot k_{C1} \cdot \gamma_c = 0,0309 \cdot 36 \cdot 0,00703 \cdot 0,15 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 9,17 \text{ кг}$$

6.4. Коэффициенты для нахождения основных потерь в стали [1 стр. 44]:

$$k_{да} = 1,6 ; k_{дз} = 1,8 \quad b = 1,4$$

6.5. Основные потери активной мощности в стали статора АД:

$$P_{ст.осн} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^b \cdot (k_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,4} \cdot (1,6 \cdot 1,45 \cdot 57,48 + 1,8 \cdot 1,9^2 \cdot 9,17) = 631,3 \text{ Вт}$$

6.6. Отношение ширины шлица пазов статора АД к воздушному зазору:

$$\frac{b_{ш1}}{\sigma} = \frac{4}{1} = 4$$

6.7. По [1 рис. П.19, б] находим значения коэффициента  $\beta_{02}$ :

$$\beta_{02} = f\left(\frac{b_{ш1}}{\sigma}\right) = 0,22$$

6.8. Амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора  $B_{02}$ :

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot B_\delta \cdot k_\sigma = 0,22 \cdot 0,82 \cdot 1,13 = 0,2 \text{ Тл}$$

6.9. Удельные поверхностные потери, т.е. потери, приходящиеся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности головок ротора:

$$p_{пов2} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n_1}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 = 0,5 \cdot 1,6 \cdot \left(\frac{36 \cdot 3000}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,22 \cdot 15,84 \cdot 10^3)^2 = 305,4 \text{ Вт}$$

Где  $k_{02} = 1,6$  [1 стр. 45]  $n \approx n_1 = 3000 \text{ об/мин}$

6.10. Полные поверхностные потери ротора:

$$P_{пов2} = p_{пов2} \cdot (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot Z_2 \cdot l_{CT2} = 30,4 \cdot (0,02014 - 0,0015) \cdot 28 \cdot 0,1 = 20,09 \text{ Вт}$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				РАСЧЕТ ПОСТОЯННЫХ ПО- ТЕРЬ МОЩНОСТИ	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	21
							Листов
							2
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого	
УТВ						гр.3Э-42с	

6.11. Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора:

$$B_{\text{пул.2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \sigma}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{1,78 \cdot 0,001}{2 \cdot 0,02014} \cdot 2 = 0,09 \text{ Тл}$$

6.12. Масса стали зубцов ротора:

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Z_2 \cdot l_{\text{ст2}} \cdot k_{\text{с2}} \cdot \gamma_c = 0,03314 \cdot 28 \cdot 0,0085 \cdot 0,14 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 9,24 \text{ кг}$$

6.13. Пульсационные потери в зубцах ротора:

$$P_{\text{пул.2}} = 0,11 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пул.2}} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left( \frac{36 \cdot 3000}{1000} \cdot 0,09 \right)^2 \cdot 9,24 = 91,75 \text{ Вт}$$

6.14. Поверхностные и пульсационные потери в статоре АД с короткозамкнутым ротором незначительны, поэтому принимаем:

$$P_{\text{пул.1}} = 0 \text{ и } P_{\text{пов1}} = 0 \text{ [1 стр. 45]}$$

6.15. Добавочные потери в стали:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пул.1}} + P_{\text{пов1}} + P_{\text{пул.2}} + P_{\text{пов2}} = 0 + 0 + 91,75 + 20,09 = 111,84 \text{ Вт}$$

6.16. Добавочные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.доб}} + P_{\text{ст.осн}} = 523,2 + 90,32 = 613,5 \text{ Вт}$$

6.17. Асинхронные двигатели с системой охлаждения IC01 с вентиляционными лопатками на замыкающих кольцах [1 стр. 46-49] механические потери найдём по выражению:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left( \frac{n}{10} \right)^2 \cdot (10D)^3 = 6 \cdot \left( \frac{3000}{10} \right)^2 \cdot (10 \cdot 0,1815)^3 = 376,6 \text{ Вт}$$

Где:  $K_T = 6$

6.18. Электрические потери в статоре в режиме холостого хода АД:

$$P_{\text{эл.х}} = m_1 \cdot r_1 \cdot I_{\mu}^2 = 3 \cdot 0,068^2 \cdot 17,8 = 64,7 \text{ Вт}$$

6.19. Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{\text{х.а}} = \frac{P_{\text{эл.х}} + P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}}{m_1 \cdot U_{1\text{ном.ф}}} = \frac{64,7 + 631,3 + 376,6}{3 \cdot 220} = 1,8 \text{ А}$$

6.20. Реактивная составляющая тока холостого хода:

$$I_{\mu} = 17,8 \text{ А} \approx I_{\text{х.р}}$$

6.21. Ток холостого хода:

$$I_{\text{х}} = \sqrt{I_{\text{х.а}}^2 + I_{\text{х.р}}^2} = \sqrt{1,8^2 + 17,8^2} = 17,89 \text{ А}$$

6.22. Коэффициент мощности АД в режиме холостого хода:

$$\cos \varphi_{\text{х}} = \frac{I_{\text{х.а}}}{I_{\text{х}}} = \frac{1,8}{17,89} = 0,1$$

## 7. РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

7.1. Параметры  $x_{12}$   $r_{12}$  схемы замещения:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{631,3}{3 \cdot 17,8^2} = 0,66 \text{ Ом}$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном.ф}}}{I_\mu} - x_1 = \frac{220}{17,8} - 0,28 = 12,08 \text{ Ом}$$

7.2. Угол  $\gamma$

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12}(r_1 + r_{12}) + x_{12}(x_1 + x_{12})} =$$

$$= \arctg \frac{0,068 \cdot 17,8 - 0,66 \cdot 0,28}{0,66(0,068 + 0,66) + 12,08(0,28 + 12,08)} = 0,24^\circ < 1^\circ$$

Тогда при расчёте коэффициентов  $a'$ ,  $a$ ,  $b'$ ,  $b$  будем использовать приближённый метод:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,28}{17,8} = 1,02$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1,02 \cdot 0,068 = 0,0730 \text{ Ом}$$

$$a' = c_1^2 = 1,02^2 = 1,04$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') = 1,02 \cdot (0,28 + 1,02 \cdot 0,27) = 0,57 \text{ Ом}$$

$$b' = 0$$

7.3. Одной из точек принятого расчётного ряда скольжений является номинальное скольжение, значение которого предварительно примем  $s_{\text{ном}} \approx r_{2*} = 0,02$

7.4 Рассчитаем некоторые параметры, значения которых не зависят от скольжения  $s$ :

- активная составляющая тока синхронного холостого хода

$$I_{0.a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot r_1 \cdot I_\mu^2}{3 \cdot U_{1\text{ном.ф}}} = \frac{631,3 + 3 \cdot 0,073 \cdot 17,8^2}{3 \cdot 220} = 1,06 \text{ А}$$

- реактивная составляющая тока синхронного холостого хода

$$I_\mu = 17,8 \text{ А} \approx I_{0.p}$$

- потери мощности, не зависящие от скольжения

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 631,3 + 376,6 = 1007,9 \text{ Вт}$$

7.5. Выражения для расчёта рабочих характеристик в порядке вычисления и результаты расчёта приведены в табл. 7.1.

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	23
							10
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42с	
УТВ							

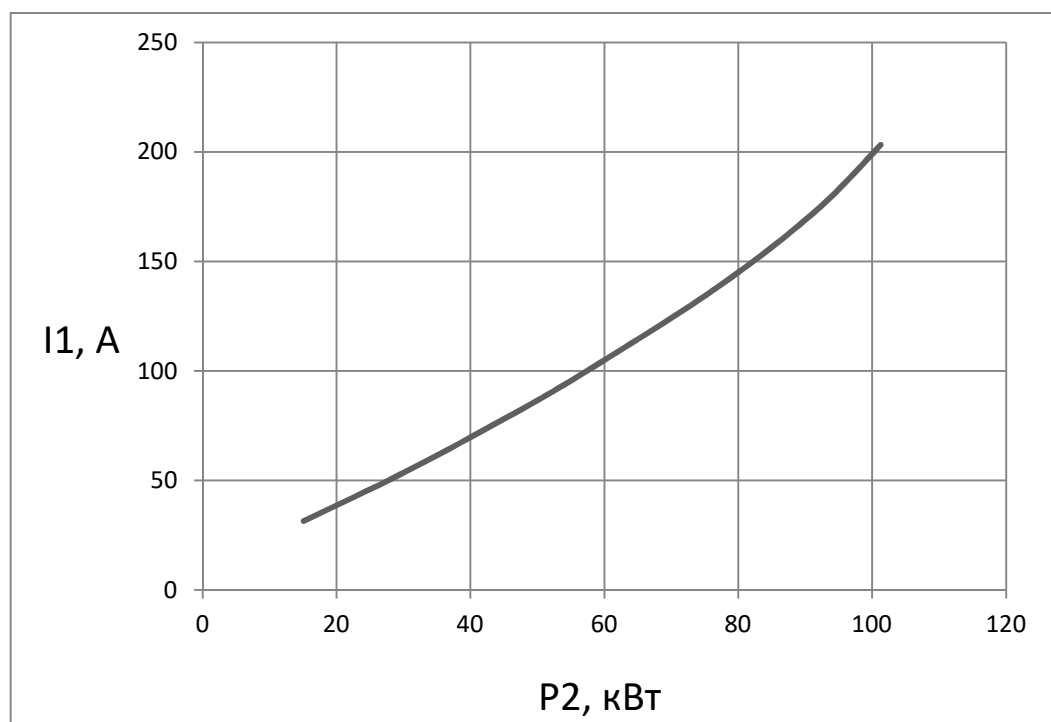
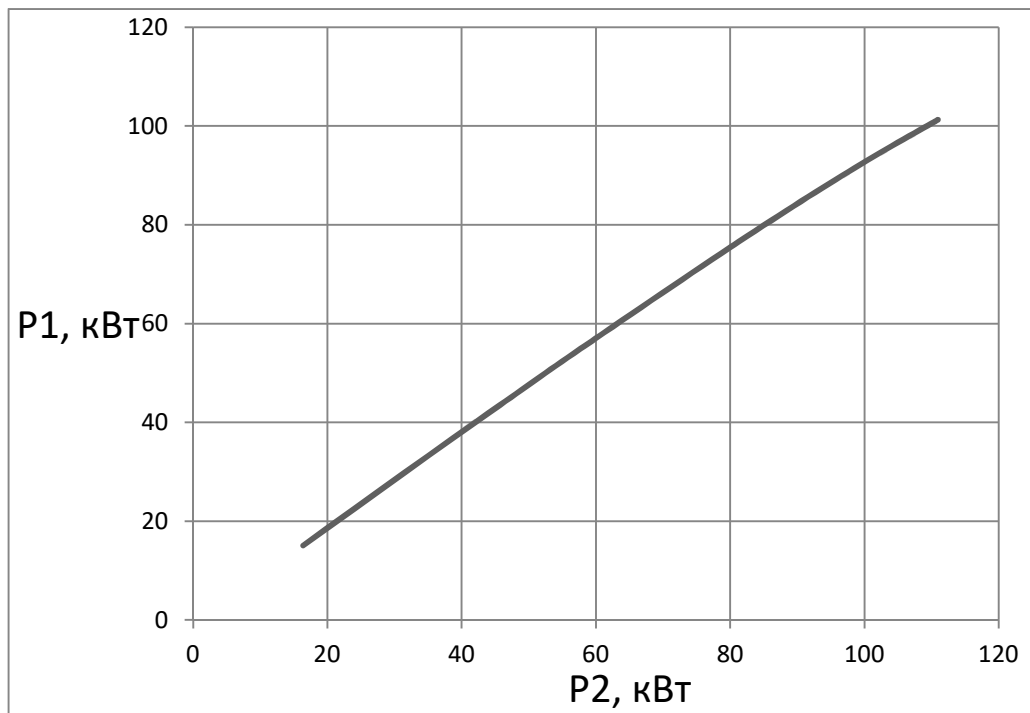
Таблица 7.1- Расчётные выражения и результаты расчёта рабочих характеристик асинхронного двигателя

№	Расчетная формула	Ед. изм.	Скольжение s							
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,03	0,04	0,05	sном =0,0156
1	$\frac{a \cdot r_2}{s}$	Ом	9,15	4,58	3,05	2,29	1,53	1,14	0,92	2,94
2	$R = a + \frac{a \cdot r_2}{s}$	Ом	9,23	4,65	3,12	2,36	1,60	1,22	0,99	3,01
3	$X = b + \frac{b \cdot r_2}{s}$	Ом	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57	0,57
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	9,24	4,68	3,18	2,43	1,70	1,34	1,14	3,06
5	$\Gamma_2 = \frac{U_{1ном.ф}}{Z}$	А	23,80	46,97	69,29	90,58	129,65	163,71	192,85	71,79
6	$\cos\varphi_2 = \frac{R}{Z}$	-	1,00	0,99	0,98	0,97	0,94	0,91	0,87	0,98
7	$\sin\varphi_2 = \frac{X}{Z}$	-	0,06	0,12	0,18	0,23	0,34	0,42	0,50	0,19
8	$I_{0.a}$	А	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
9	$I_{0.p}$	А	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80	17,80
10	$I_{1.a} = I_{0.a} + \Gamma_2 \cdot \cos\varphi_2$	А	24,82	47,68	69,22	89,11	123,17	149,31	168,11	71,59
11	$I_{1.p} = I_{0.p} + \Gamma_2 \cdot \sin\varphi_2$	А	19,27	23,52	30,24	39,06	61,35	87,24	114,15	31,15
12	$I_1 = \sqrt{I_{1.a}^2 + I_{1.p}^2}$	А	31,42	53,16	75,54	97,29	137,61	172,93	203,20	78,08
13	$\Gamma_2 = c_1 \cdot \Gamma_2$	А	24,28	47,91	70,67	92,39	132,24	166,98	196,70	73,22
14	$P_1 = 3U_{1ном.ф} \cdot I_{1.a} \cdot 10^{-3}$	кВт	16,38	31,47	45,69	58,81	81,29	98,55	110,95	47,25
15	$P_{\text{э1}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,08	0,11	0,19	0,31	0,77	1,55	2,66	0,20
16	$P_{\text{э2}} = 3 \cdot \Gamma_2^2 \cdot r_2 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,13	0,37	0,75	1,25	2,50	3,95	5,45	0,80
17	$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}}$	кВт	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
18	$P_{\text{доб}} = 0,005 \cdot P_1$	кВт	0,08	0,16	0,23	0,29	0,41	0,49	0,55	0,24
19	$\sum P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}$	кВт	1,30	1,65	2,18	2,86	4,68	7,00	9,67	2,25
20	$P_2 = P_1 - \sum P$	-	15,08	29,82	43,51	55,95	76,61	91,54	101,28	45,00
21	$\eta = 1 - \frac{\sum P}{P_1}$	-	0,92	0,95	0,95	0,95	0,94	0,93	0,91	0,95
22	$\cos\varphi = \frac{I_{1.a}}{I_1}$	-	0,79	0,90	0,92	0,92	0,90	0,86	0,83	0,92

7.5. По рабочим характеристикам уточняем номинальные параметры двигателя по известной из условия проектирования номинальной мощности  $P_{2\text{ном}} = 45 \text{ кВт}$ :

- номинальный ток  $I_{1\text{ном}} = 78,08 \text{ А}$  ;
- номинальный коэффициент мощности  $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,92$
- номинальный КПД  $\eta_{\text{ном}} = 0,95$
- номинальное скольжение  $s_{\text{ном}} = 0,0156$

157. Для уточнённого значения номинального скольжения  $s_{\text{ном}} = 0,018$  рассчитываем параметров в табл. 7.1 и заносим результаты в последний столбец





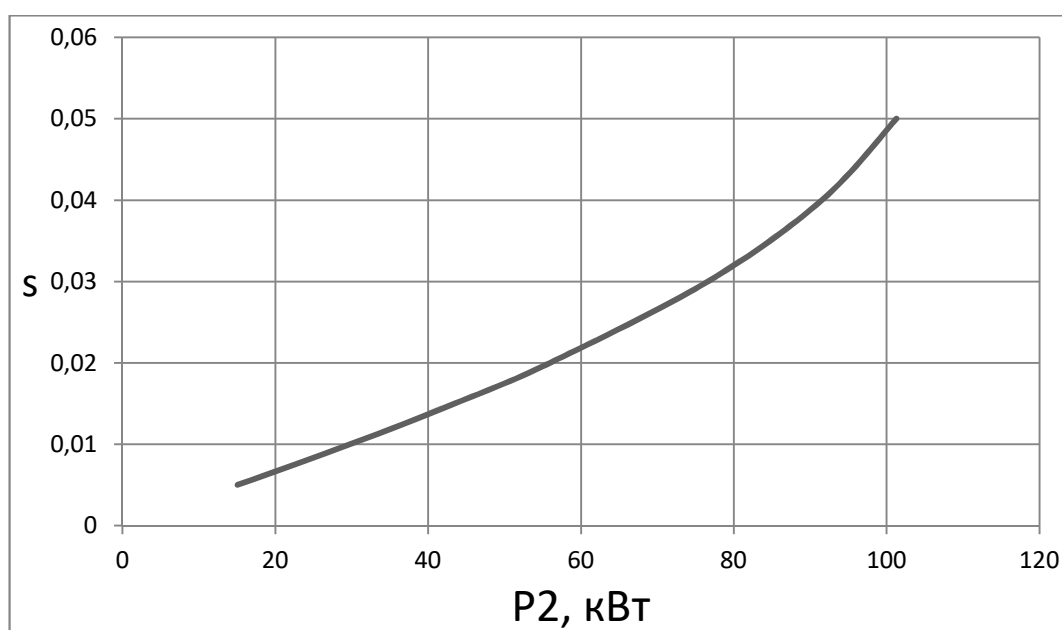
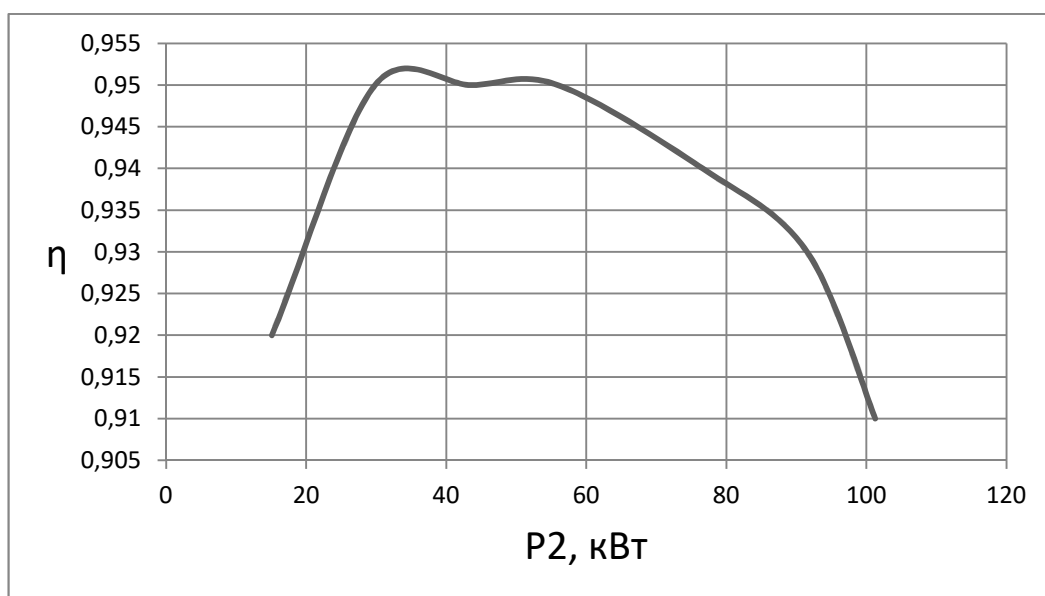
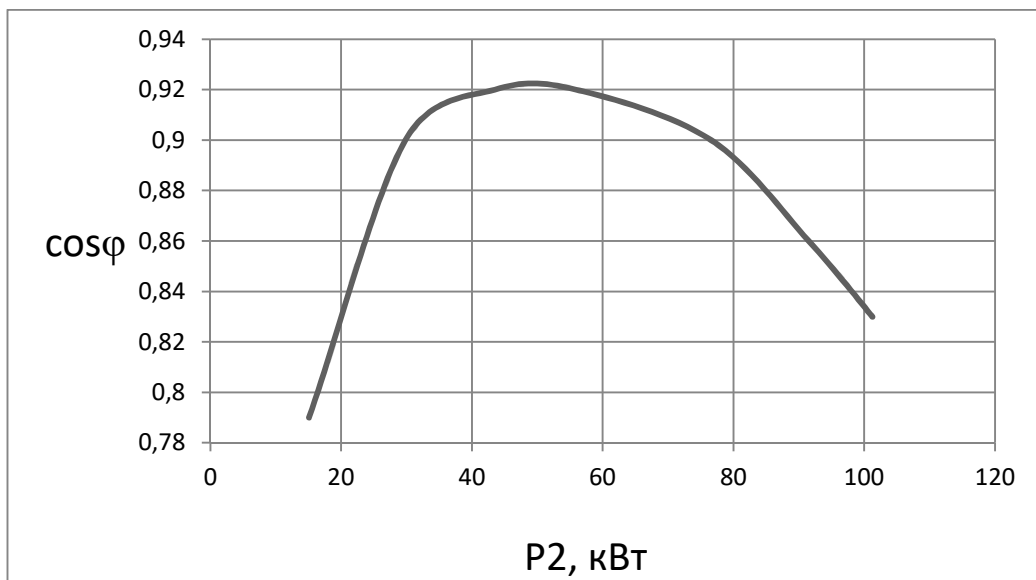


Рисунок 7.1-Рабочие характеристики двигателя

## 8.ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

8.1 В начале выполним расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока, но без учета влияния насыщения от полей рассеяния. Расчёт проведём для ряда скольжений, который будет начинаться со значения чуть ниже критического и заканчиваться 1. Значение критического скольжения также необходимо включить в расчётный ряд.

Приведем расчет для значения скольжения  $s = 1$

8.2. Расчётная высота стержня в пазу ротора, т.к. паз закрытый:

$$h_{c2} = h_{п2} - (h_{ш2} + h'_{ш2}) = 33,6 - (0,7 + 1) = 31,9 \text{ мм}$$

8.3. Так называемая “приведённая высота” стержня ротора:

$$C = 63,61 \cdot h_{c2} \cdot \sqrt{s} = 63,61 \cdot 0,0319 \cdot \sqrt{1} = 2,03$$

8.4. По [1 рис. П.22 и П.23] соответственно находим значения величин  $\varphi$  и  $\varphi'$ :

$$\varphi = f(C) = 0,84$$

$$\varphi' = f(C) = 0,69$$

8.5. Глубина проникновения тока:

$$h_r = \frac{h_{c2}}{1 + \varphi} = \frac{0,0319}{1 + 0,84} = 17,34 \text{ мм}$$

8.6. Проверяем условие:

$$\frac{b_1}{2} < h_r < h_1 + \frac{b_1}{2}$$

$$\frac{10,1}{2} = 5,55 < 17,34 < 24,5 + \frac{10,1}{2} = 30,05$$

Условие выполняется, поэтому площадь сечения верхней части стержня ротора  $q_r$ , по которому распространяется ток при пуске, определится по формуле:

$$q_r = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \frac{3,14 \cdot 10,1^2}{8} + \frac{10,2 + 7,34}{2} \cdot \left( 17,34 - \frac{10,1}{2} \right) = 147,2 \text{ мм}^2$$

Где:

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left( h_r - \frac{b_1}{2} \right) = 10,1 - \frac{10,1 - 4,6}{24,5} \cdot \left( 17,34 - \frac{10,1}{2} \right) = 7,34 \text{ мм}$$

8.7. Коэффициент  $k_r$ :

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{228,4}{147,2} = 1,55$$

8.8. Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока:

$$K_R = \frac{r_2 + r'_c \cdot (k_r - 1)}{r_2} = \frac{57,98 \cdot 10^{-6} + 32,9 \cdot 10^{-6} \cdot (1,55 - 1)}{57,98 \cdot 10^{-6}} = 1,31$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.		
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата			
Разраб	Пархомович				ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ	Лит.	Лист
Пров	Козлов					У	27
							Листов
							10
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого	
УТВ						гр.3Э-42с	

Где:  $r'_c = r_c = 32,9 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$

8.9. Приведенное активное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r'_{2c} = K_R \cdot r'_2 = 0,044 \cdot 1,31 = 0,06 \text{ Ом}$$

8.10. Коэффициент магнитной проводимости участка паза ротора, занятого проводником с обмоткой:

$$\begin{aligned} \lambda'_{п2} &= \frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c}\right) + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{2 \cdot b_1} = \\ &= \frac{26,34}{3 \cdot 10,1} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot 10,1^2}{8 \cdot 228,4}\right) + 0,66 - \frac{1,5}{2 \cdot 10,1} = 1,45 \end{aligned}$$

8.11. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока:

$$\lambda_{п2c} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2c} = 3,17 - 0,45 = 2,72$$

Где:  $\Delta\lambda_{п2c} = \lambda'_{п2} \cdot (1 - k_d) = 1,45 \cdot (1 - 0,69) = 0,45$

$$k_d = \varphi' = 0,69$$

8.12. Коэффициент, показывающий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока:

$$K_X = \frac{\lambda_{п2c} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = \frac{2,72 + 1,45 + 1,45}{3,17 + 1,45 + 1,45} = 0,93$$

8.13. Приведенное индуктивное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$x'_{2c} = K_X \cdot x'_2 = 0,27 \cdot 0,93 = 0,25 \text{ Ом}$$

8.14. В пусковом режиме активным сопротивлением  $r_{12}$  схемы замещения АД на [1 рис. П.20] пренебрегают, то есть  $r_{12п} = 0$ . Индуктивное сопротивление взаимной индукции в схеме замещения АД [1 рис. П.20] в пусковом режиме:

$$x_{12п} = k_\mu \cdot x_{12} = 1,38 \cdot 12,08 = 16,67 \text{ Ом}$$

8.15. Коэффициент  $c_1$  в пусковом режиме АД:

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1 + \frac{0,28}{16,67} = 1,02$$

8.16. Активное  $R_\Pi$  и реактивное  $X_\Pi$  сопротивления правой ветви Г-образной схемы замещения АД в пусковом режиме с учётом вытеснения тока:

$$R_\Pi = r_1 + \frac{c_{1п} \cdot r'_{2c}}{s} = 0,68 + \frac{1,02 \cdot 0,06}{1} = 0,13 \text{ Ом}$$

$$X_\Pi = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2c} = 0,28 + 1,02 \cdot 0,25 = 0,53 \text{ Ом}$$

8.17. Ток в обмотке ротора с учётом вытеснения тока в пусковом режиме:

$$\Gamma_{2.п} = \frac{U_{1ном.ф}}{\sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,13^2 + 0,53^2}} = 400,75 \text{ А}$$

8.18. Пусковой ток статора с учётом вытеснения тока:

$$I_{1.п} = \Gamma_{2.п} \cdot \frac{\sqrt{R_\Pi^2 + (X_\Pi + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}} = 400,75 \cdot \frac{\sqrt{0,13^2 + (0,53 + 16,67)^2}}{1,02 \cdot 16,67} = 406,67 \text{ А}$$

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.	Лист
						28
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата		

8.18. Кратность пускового тока АД с учётом вытеснения тока:

$$I_{1.п}^* = \frac{I_{1.п}}{I_{1.ном}} = \frac{406,67}{89,06} = 4,5$$

8.19. Кратность пускового момента АД с учётом вытеснения тока:

$$M^* = \left( \frac{I_{1.п}}{I_{2.ном}} \right)^2 K_R \frac{s_{ном}}{s} = \left( \frac{406,67}{78,08} \right)^2 \cdot 1,31 \cdot \frac{0,0156}{1} = 0,56$$

где  $I_{2.ном} = 65,28$  А – значение приведённого тока ротора при номинальном скольжении  $s_{ном} = 0,0182$

8.20. Предварительно значение критического скольжения:

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{\frac{x_1}{c_{1п}} + x'_2} = \frac{0,044}{\frac{0,28}{1,02} + 0,93} = 0,062$$

Таблица 8.1- Расчётные выражения и результаты расчёта пусковых характеристик  
асинхронного двигателя с учётом эффекта вытеснения тока

№	Расчетная формула	Ед. изм	Скольжение $s$								
			0,05	0,062	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1
1	$C = 63,61 \cdot h_{c2} \cdot \sqrt{s}$	-	0,45	0,51	0,64	0,91	1,11	1,43	1,70	1,93	2,03
2	$\varphi = f(C)$	-	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,27	0,53	0,76	0,84
3	$h_r = \frac{h_{c2}}{1 + \varphi}$	мм	30,67	30,38	30,09	29,27	28,48	25,12	20,85	18,13	17,34
4	$k_r = \frac{q_c}{q_r}$	-	1,01	1,02	1,03	1,04	1,06	1,16	1,33	1,49	1,55
5	$K_R = \frac{r_2 + r'_c \cdot (k_r - 1)}{r_2}$	-	1,01	1,01	1,01	1,02	1,04	1,09	1,19	1,28	1,31
6	$r'_{2c} = K_R \cdot r'_2$	Ом	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06
7	$k_d = \varphi' = f(C)$	-	0,99	0,98	0,98	0,96	0,94	0,91	0,83	0,77	0,69
8	$\lambda_{п2c} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2c}$	-	3,16	3,14	3,14	3,11	3,08	3,04	2,92	2,84	2,72
9	$K_X = \frac{\lambda_{п2c} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}$	-	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,96	0,94	0,93
10	$x'_{2c} = K_X \cdot x'_2$	Ом	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25
11	$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} \cdot r'_{2c}}{s}$	Ом	0,97	0,80	0,52	0,30	0,22	0,17	0,14	0,13	0,13
12	$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x'_{2c}$	Ом	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,54	0,54	0,53
13	$\Gamma_{2.п} = \frac{U_{1ном.ф}}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}}$	А	196,94	226,59	289,23	350,95	370,50	383,94	391,40	396,23	400,75
14	$I_{1.п} = \Gamma_{2.п} \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}}$	А	200,44	230,49	294,03	356,63	376,44	390,04	397,50	402,31	406,77
15	$I_{1.п}^* = \frac{I_{1.п}}{I_{1ном}}$		2,21	2,54	3,25	3,94	4,16	4,31	4,39	4,45	4,50
16	$M^* = \left(\frac{I_{1.п}}{\Gamma_{2.ном}}\right)^2 K_R \frac{s_{ном}}{s}$		2,07	2,22	2,15	1,67	1,25	0,85	0,69	0,59	0,56

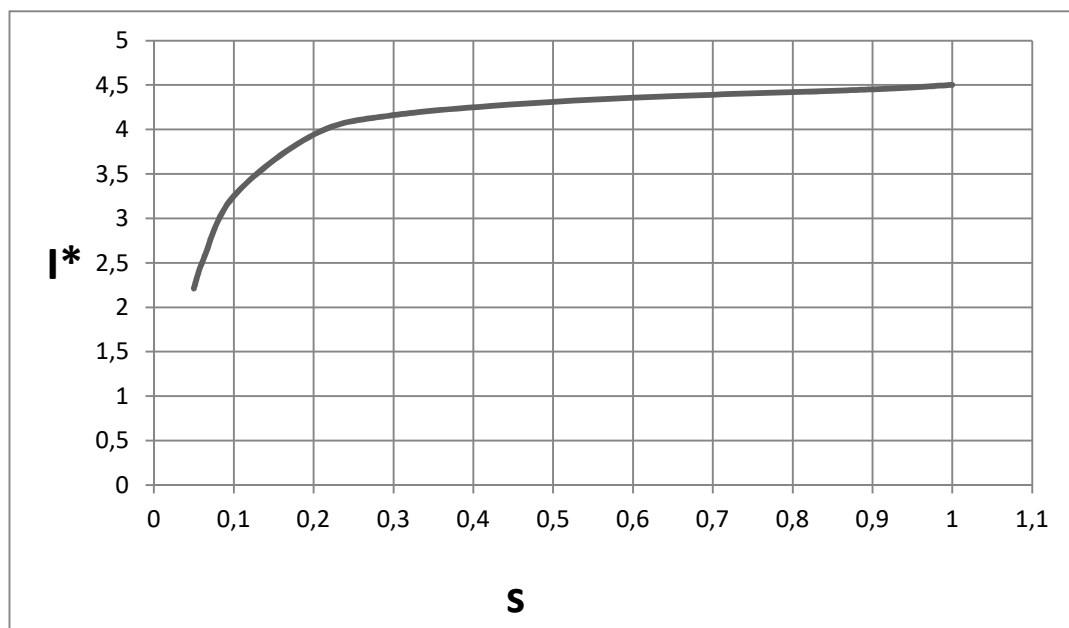
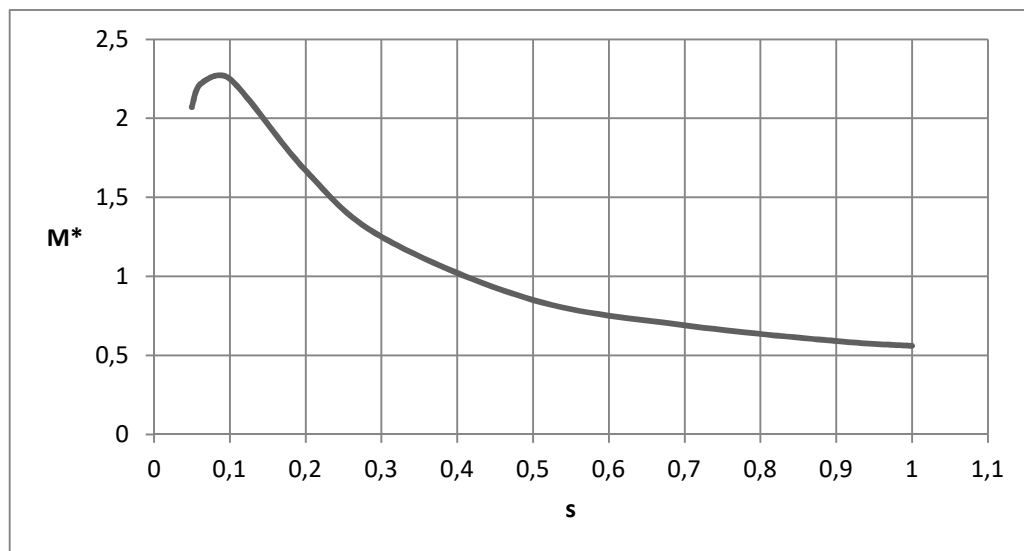


Рисунок 8.1-Пусковые характеристики двигателя с учётом эффекта вытеснения тока

По построенным пусковым характеристикам уточняем, что  $s_{кр} = 0,07$ .  
Найдём максимальный момент АД, соответствующий критическому скольжению, с учётом вытеснения тока:

$$M^* = \left( \frac{I_{2.п}(s_{кр})}{I_{2.ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s_{кр}} = \left( \frac{400,75}{78,08} \right)^2 \cdot 1,01 \cdot \frac{0,0156}{0,07} = 2,22$$

8.21. Определим необходимость учёта влияния насыщения от полей рассеяния при расчёте пусковых характеристик АД. Для этого найдём значение полного тока паза статора в начальный момент времени пуска двигателя:

$$I_{1.паза} = \frac{I_{1.п} \cdot u_{п}}{a} = \frac{406,77 \cdot 18}{2} = 3660,9$$

Полученное значение  $I_{1.паза} > 400A$ , поэтому учёт влияния насыщения от полей рассеяния при расчёте пусковых характеристик АД необходим.

8.22. Выполним расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока и влияния насыщения от полей рассеяния.

8.23. Первоначально зададимся значением коэффициента увеличения тока от насыщения зубцовой зоны полями рассеяния:  $k_{\text{нас}}=1,28$ .

8.24. Средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора:

$$F_{\text{п.ср}} = 0,7 \cdot \frac{k_{\text{нас}} \cdot I_{1.\text{п}} \cdot u_{\text{п}}}{a} \cdot \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{\text{обм1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \\ = 0,7 \cdot \frac{1,27 \cdot 406,77 \cdot 18}{2} \cdot \left( 0,67 + 0,61 \cdot 0,78 \cdot \frac{36}{28} \right) = 4204,36 \text{ А}$$

8.25. Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-3} = \frac{4204,34}{1,6 \cdot 1 \cdot 1,06} \cdot 10^{-3} = 2,49 \text{ Тл}$$

где коэффициент

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{1}{15,8 + 20,14}} = 1,06$$

8.26. Коэффициент  $k_{\delta}$ , характеризующий отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины [1 рис. П.26]:

$$k_{\delta} = f(B_{\phi\delta}) = 0,77$$

8.27. Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов статора:

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{z1} - b_{\text{ш1}}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (15,8 - 4) \cdot (1 - 0,77) = 2,71$$

8.28. Паз статора полузакрытый, поэтому вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния паза статора:

$$\Delta\lambda_{\text{п1.нас}} = \frac{h_{\text{ш1}} + 0,58 \cdot h_{\text{к}}}{b_{\text{ш1}}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{c_{\varepsilon 1} + 1,5 \cdot b_{\text{ш1}}} = \frac{1 + 0,58 \cdot 2,7}{4} \cdot \frac{2,71}{2,71 + 1,5 \cdot 4} = 0,2$$

8.29. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора при насыщении:

$$\lambda_{\text{п1.нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1.нас}} = 1,17 - 0,2 = 0,97$$

8.30. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов статора:

$$\lambda_{\text{д1.нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot k_{\delta} = 1,47 \cdot 0,77 = 1,13$$

8.31. Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x_{1.\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1.нас}} + \lambda_{\text{д1.нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}} = 0,28 \cdot \frac{1,13 + 0,97 + 2,02}{1,47 + 1,17 + 2,02} = 0,25 \text{ Ом}$$

8.32. Дополнительное эквивалентное раскрытие пазов ротора:

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{\text{ш2}}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (20,14 - 1,5) \cdot (1 - 0,77) = 4,29$$

8.33. Паз ротора полуоткрытый, поэтому вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния паза ротора:

$$\Delta\lambda_{\text{п2.нас}} = \frac{h_{\text{ш2}} + h'_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{c_{\varepsilon 2} + b_{\text{ш2}}} = \frac{0,7 + 1}{1,5} \cdot \frac{4,29}{4,29 + 1,5} = 0,84$$

8.34. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора при насыщении:

$$\lambda_{п2.с.нас} = \lambda_{п2с} - \Delta\lambda_{п2.нас} = 2,72 - 0,84 = 1,88$$

8.35. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния при насыщении участков зубцов ротора:

$$\lambda_{д2.нас} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta} = 1,45 \cdot 0,77 = 1,12$$

8.36. Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$x'_{2с.нас} = x'_{2} \cdot \frac{\lambda_{п2.с.нас} + \lambda_{д2.нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,27 \cdot \frac{1,12 + 1,88 + 1,45}{3,17 + 1,45 + 1,45} = 0,2 \text{ Ом}$$

8.36. Коэффициент  $c_1$  в пусковом режиме АД с учётом насыщения:

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1.нас}}{x_{12п}} = 1 + \frac{0,25}{16,67} = 1,01$$

8.37. Активное  $R_{п.нас}$  и реактивное  $X_{п.нас}$  сопротивления правой ветви Г-образной схемы замещения АД в пусковом режиме с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$R_{п.нас} = r_1 + \frac{c_{1п.нас} \cdot r'_{2с}}{s} = 0,068 + \frac{1,01 \cdot 0,06}{1} = 0,13 \text{ Ом}$$

$$X_{п.нас} = x_{1.нас} + c_{1п.нас} \cdot x'_{2с.нас} = 0,25 + 1,01 \cdot 0,2 = 0,45 \text{ Ом}$$

8.38. Ток в обмотке ротора в пусковом режиме с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$\Gamma_{2.п.нас} = \frac{U_{1ном.ф}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,13^2 + 0,45^2}} = 471,52 \text{ А}$$

8.39. Пусковой ток статора с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$I_{1п.нас} = \Gamma_{2.п.нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \cdot x_{12п}} = 471,52 \cdot \frac{\sqrt{0,18^2 + (0,6 + 20,5)^2}}{20,5 \cdot 1,01} = 477,13 \text{ А}$$

8.40. Кратность пускового тока АД с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$I_{1.п}^* = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1.ном}} = \frac{477,13}{89,06} = 5,36$$

8.41. Кратность пускового момента АД с учётом вытеснения тока и насыщения:

$$M^* = \left( \frac{\Gamma_{2.п.нас}}{\Gamma_{2.ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left( \frac{471,52}{78,08} \right)^2 \cdot 1,31 \cdot \frac{0,0156}{1} = 0,75$$

8.42. Полученный в результате расчёта коэффициент насыщения:

$$k_{нас} = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1.п}} = \frac{477,13}{406,77} = 1,17$$

Данное значение отличается от принятого изначально  $k_{нас}=1,28$  на 9 %, что допустимо и означает, что уточняющий пересчёт пусковых параметров АД не требуется.



Таблица 8.2- Расчётные выражения и результаты расчёта пусковых характеристик асинхронного двигателя с учётом эффекта вытеснения тока и насыщения

№	Расчетная формула	Ед. изм.	Скольжение s								
			0,05	0,062	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1
1	$k_{\text{нас}}$	-	1,00	1,00	1,10	1,15	1,20	1,20	1,22	1,25	1,28
2	$F_{\text{п.ср}} = 0,7 \cdot \frac{k_{\text{нас}} \cdot I_{1.\text{п}} \cdot U_{\text{п}}}{a} \cdot (k_{\beta} + k_{\gamma} \cdot k_{\text{обм1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2})$	-	1618,55	1861,20	2611,72	3311,75	3647,69	3779,48	3915,96	4060,81	4204,36
3	$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} \cdot 10^{-3}$	мм	0,96	1,10	1,54	1,96	2,16	2,23	2,32	2,40	2,49
4	$k_{\delta} = f(B_{\phi\delta})$	-	0,96	0,96	0,91	0,86	0,82	0,80	0,79	0,79	0,77
5	$c_{\text{э1}} = (t_{z1} - b_{\text{ш1}}) \cdot (1 - k_{\delta})$	-	0,47	0,47	1,06	1,65	2,12	2,36	2,48	2,48	2,71
6	$\Delta\lambda_{\text{п1.нас}} = \frac{h_{\text{ш1}} + 0,58 \cdot h_{\kappa}}{b_{\text{ш1}}} \cdot \frac{c_{\text{э1}}}{c_{\text{э1}} + 1,5 \cdot b_{\text{ш1}}}$	Ом	0,05	0,05	0,10	0,14	0,17	0,18	0,19	0,19	0,20
7	$\lambda_{\text{п1.нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1.нас}}$	-	1,12	1,12	1,07	1,03	1,00	0,99	0,98	0,98	0,97
8	$\lambda_{\text{д1.нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot k_{\delta}$	-	1,41	1,41	1,34	1,26	1,21	1,18	1,16	1,16	1,13
9	$x_{1.\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1.нас}} + \lambda_{\text{д1.нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}}$	-	0,27	0,27	0,27	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
10	$c_{\text{э2}} = (t_{z2} - b_{\text{ш2}}) \cdot (1 - k_{\delta})$	Ом	0,75	0,75	1,68	2,61	3,36	3,73	3,91	3,91	4,29
11	$\Delta\lambda_{\text{п2.нас}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} \cdot \frac{c_{\text{э2}}}{c_{\text{э2}} + 1,5 \cdot b_{\text{ш2}}}$	Ом	0,38	0,38	0,60	0,72	0,78	0,81	0,82	0,82	0,84
12	$\lambda_{\text{п2.нас}} = \lambda_{\text{п2с}} - \Delta\lambda_{\text{п2.нас}}$	Ом	2,76	2,76	2,54	2,39	2,30	2,23	2,10	2,02	1,88
13	$\lambda_{\text{д2.нас}} = \lambda_{\text{д2}} \cdot k_{\delta}$	А	1,39	1,39	1,32	1,25	1,19	1,16	1,15	1,15	1,12
14	$x'_{2\text{с.нас}} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п2.нас}} + \lambda_{\text{д2.нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}}}$	А	0,25	0,25	0,24	0,23	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20
15	$c_{1\text{п.нас}} = 1 + \frac{x_{1.\text{нас}}}{x_{12\text{п}}}$		1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,01
16	$R_{\text{п.нас}} = r_1 + \frac{c_{1\text{п.нас}} \cdot r'_{2\text{с}}}{s}$		0,88	0,72	0,47	0,32	0,24	0,19	0,16	0,14	0,13
17	$X_{\text{п.нас}} = x_{1.\text{нас}} + c_{1\text{п.нас}} \cdot x'_{2\text{с}}$		0,53	0,53	0,51	0,49	0,48	0,47	0,46	0,46	0,45
18	$\Gamma'_{2.\text{п.нас}} = \frac{U_{1\text{ном.ф}}}{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + X_{\text{п.нас}}^2}}$		214,27	245,71	317,09	375,72	413,03	433,97	451,28	460,02	471,52
19	$I_{1\text{п.нас}} = \Gamma'_{2.\text{п.нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{п.нас}}^2 + (X_{\text{п.нас}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{п.нас}} \cdot x_{12\text{п}}}$		217,76	249,61	321,71	380,89	418,51	439,60	456,95	465,70	477,13
20	$k'_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{п.нас}}}{I_{1\text{п}}}$		1,09	1,08	1,09	1,07	1,11	1,13	1,15	1,16	1,17
21	$I_{1.\text{п}}^* = \frac{I_{1\text{п.нас}}}{I_{1\text{ном}}}$		2,45	2,80	3,61	4,28	4,70	4,94	5,13	5,23	5,36
22	$M^* = (\frac{\Gamma'_{2.\text{п.нас}}}{\Gamma'_{2.\text{ном}}})^2 K_R \frac{s_{\text{ном}}}{s}$		2,37	2,52	2,32	1,88	1,51	1,05	0,89	0,77	0,75

8.43. По построенным пусковым характеристикам определяем критическое скольжение и максимальный момент, соответствующий критическому скольжению:

$$s_{кр} = 0,06$$

$$M_{max}^* = 2,52$$

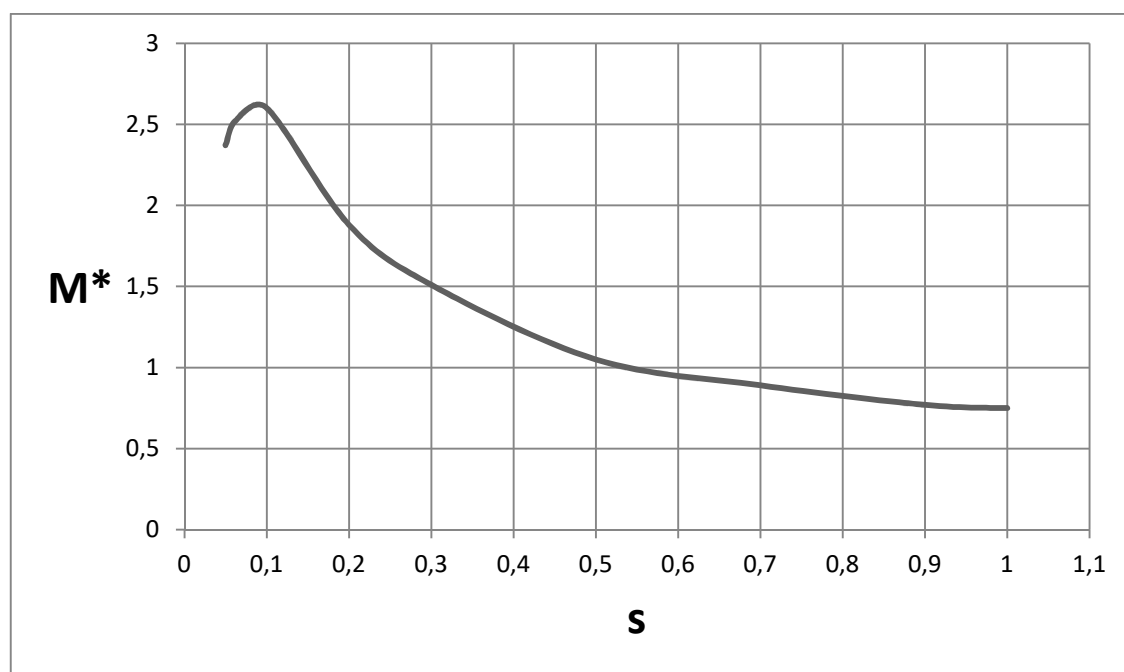
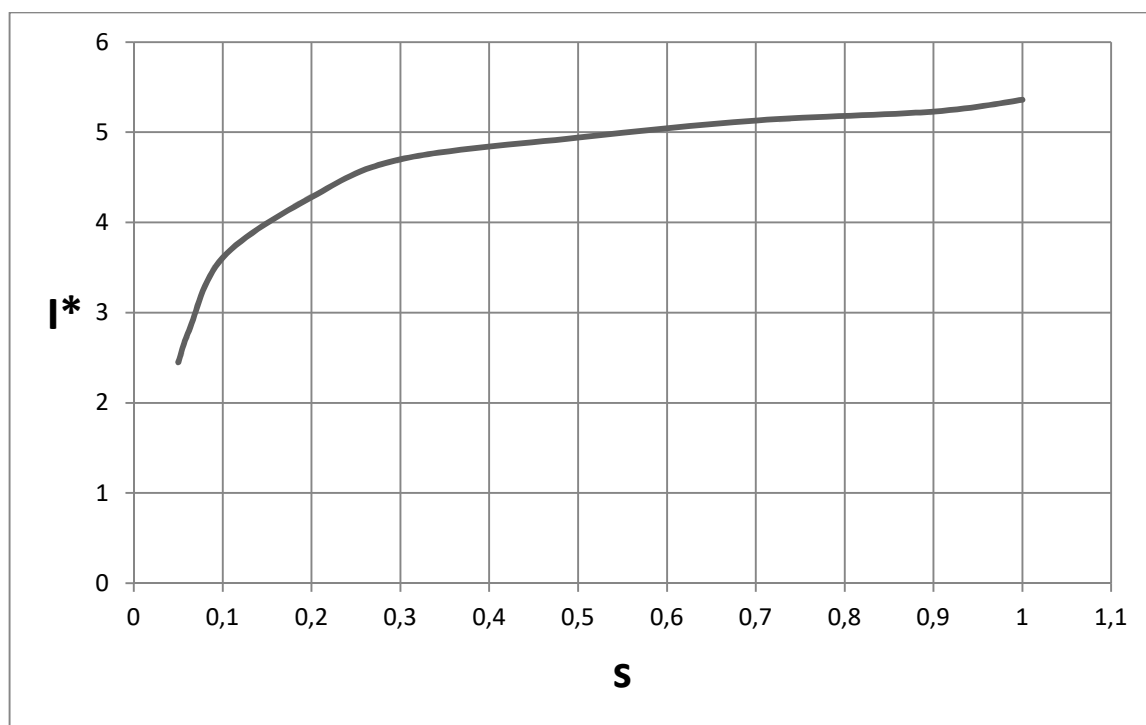


Рисунок 8.2-Пусковые характеристики двигателя с учётом эффекта вытеснения тока и насыщения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проектировании данного электродвигателя были рассчитаны размеры статора и ротора, выбраны типы обмоток, обмоточные провода, изоляция, материалы активных и конструктивных частей машины. Отдельные части машины были сконструированы так, чтобы при изготовлении машины трудоёмкость и расход материалов были наименьшими, а при эксплуатации машина обладала наилучшими энергетическими показателями. При этом данная электрическая машина соответствует условиям применения её в электроприводе.

При выполнении проекта учитывалось соответствие технико-экономических показателей машины современному мировому уровню. Проектирование производилось с учётом требований государственных и отраслевых стандартов. При проектировании пришлось учесть назначение и условия эксплуатации, стоимость активных и конструктивных материалов, КПД, технологию производства, надёжность в работе и патентную чистоту.

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.							
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата								
Разраб		Пархомович			ЗАКЛЮЧЕНИЕ			Лит.	Лист	Листов		
Пров		Козлов						У		36	1	
								ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42с				
Н. Контр.												
УТВ												

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование трехфазного асинхронного электродвигателя : учеб.-метод. пособие по курсовому проектированию по дисциплинам «Электрические машины» и «Электромеханика» для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети» и 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» днев. и заоч. форм обучения /сост.: К. М. Медведев, А. В. Козлов. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2019. – 157 с. –

2. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / И.П. Копылов [и др.] ; под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

3. Асинхронные двигатели серии 4А : Справочник / А.Э. Кравчик [и др.]. – М. : Энергоиздат, 1982. – 504 с. : ил.

4. Обмотки электрических машин : метод. указания к практ. занятиям и курсовому проекту по дисциплине «Электрические машины» для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» и 1-43 01 03 «Электроснабжение» днев. и заоч. форм обучения / авт.-сост.: В. С. Захаренко, В. В. Тодарев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2007. – 49 с.

					КП.1-43.01.03с.42с.21.24.ПЗ.			
Изм.	Лист	№ докум	Подпись	Дата				
Разраб	Пархомович				СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	Лит.	Лист	Листов
Пров	Козлов					У	37	1
Н. Контр.						ГГТУ им.П.О.Сухого гр.3Э-42с		
Утв								