

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Факультет Энергетический
Кафедра Электромеханика и электромеханические системы

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

Рецензент


« 8 » июня 2016 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,

д.т.н., профессор

 / С.Г. Воронин/
« 8 » июня 2016 г.

Асинхронный привод насоса 45кВт

ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ

ЮУрГУ – 140400.62.2016.146.ПЗ.ВКП

Руководитель, доцент

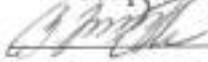
 / Н.Ю.Сидоренко/
« 06 » июня 2016 г.

Автор

студент группы Э – 452

 / Д.А. Яковлев/
« 01 » июня 2016 г.

Нормоконтролер, ассистент

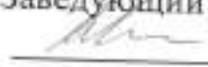
 / Р.М. Байтимеров/
« 06 » июня 2016 г.

Челябинск 2016

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)

Факультет Энергетический
Кафедра Электромеханика и электромеханические системы

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой, д.т.н
 / С.Г. Воронин /
« 15 » 04 2016 г.

ЗАДАНИЕ

На выпускной квалификационный проект студента

Яковлева Дмитрия Александровича

(фамилия, имя, отчество)

Группа Э-452

1. Тема проекта: Асинхронный привод насоса 45 кВт
2. Утверждена приказом по университету от «15» апреля 2016 г. №661

3. Исходные данные к проекту:

<u>Номинальная мощность</u>	<u>45 кВт</u>
<u>Частота вращения ротора</u>	<u>1000об/мин</u>
<u>Число полюсов, число фаз</u>	<u>2p=6</u>
<u>Напряжение питания</u>	<u>380/660 В</u>
<u>Степень защиты</u>	<u>IP23</u>
<u>Система охлаждения</u>	<u>IC01</u>
<u>Класс изоляции</u>	<u>F</u>

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)

Введение

1 Частотное регулирование

2 Электромагнитный расчет

3 Тепловой расчет

4 Сборка

5 3D моделирование

Заключение

5. Перечень графического материала:

Эскиз пазовой зоны статора – 1 шт.

Эскиз зубцовой зоны ротора – 1 шт.

Графики пусковых и рабочих характеристик – 2 шт

Схема обмотки статора – 1 шт.

Всего: 5 листов

6. Дата выдачи задания 10 марта 2016г.

Руководитель Сидоренко Н.Ю.

Н.Ю. Сидоренко
(подпись руководителя)

Задание принял к исполнению Яковлев Д.А.

Д.А. Яковлев
(подпись студента)

Заведующий кафедрой С.Г. Воронин /Воронин С.Г./

Руководитель проекта Н.Ю. Сидоренко / Сидоренко Н.Ю./

Студент Д.А. Яковлев / Яковлев Д.А./

АННОТАЦИЯ

Яковлев Д.А. Асинхронный двигатель
с короткозамкнутым ротором – Челябинск:
ЮУрГУ, Э-452, 2016, 49 с., 18 ил., 2 табл.,
библиографический список - 17 наим.

В данном выпускном квалификационном проекте разработан асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для работы в приводе насоса. Проведён электромагнитный расчёт по стандартным методикам расчёта электрических машин, а также тепловой расчёт. Построены рабочие и пусковые характеристики двигателя.

В графической части представлены: рабочие характеристики; эскиз пазовой зоны статора; эскиз зубцовой зоны ротора; схема обмотки.

При разработке квалификационной работы были использованы следующие программные средства: Microsoft Office, SolidWorks.

				ЮУрГУ-140400.2016.146 ПЗ. ВКП				
№	Лист	№ докум.	Подпись	Дат	Асинхронный привод насоса 45 кВт	Лит.	Лист	Листов
1	Яковлев		<i>Яковлев</i>	1.6.16				49
2	Сидоренко		<i>Сидоренко</i>	6.6.16			3	
3	Пястолов		<i>Пястолов</i>	2.6.16				
4	Бейтимеров		<i>Бейтимеров</i>	28.6.16				
5	Воронин		<i>Воронин</i>					
						ЮУрГУ Кафедра ЭМЭМС		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 КРАТКАЯ ИСТОРИЯ НАСОСНОЙ ТЕХНИКИ.....	6
2 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	9
3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ	
3.1 Выбор главных размеров.....	10
3.2 Определение z_1 , w_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора.....	12
3.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора.....	13
3.4 Расчет ротора.....	16
3.5 Расчет магнитной цепи.....	18
3.6 Параметры рабочего режима.....	20
3.7 Расчет потерь.....	22
3.8 Расчет рабочих характеристик.....	23
3.9 Расчет пусковых характеристик с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния.....	26
4 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ.....	31
5 КОНСТРУКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ДВИГАТЕЛЮ.....	34
6 ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ ДВИГАТЕЛЯ.....	36
7 СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВОПРОС. 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	48

ВВЕДЕНИЕ

Электрические машины применяются во всех отраслях промышленности, в транспорте, в сельском хозяйстве, в военной промышленности и быту. От правильного выбора и использования электрических машин во многом зависит технический уровень изделий многих отраслей промышленности.

Порядка 95% всех электрических машин в мире составляют асинхронные двигатели. Это обусловлено их простотой в использовании, надёжностью и возможностью работать практически в любых условиях, а массовое производство асинхронных двигателей делает их дешёвыми.

Таким образом, проектирование асинхронных двигателей на разные мощности, разные габариты и с различными характеристиками является очень актуальной задачей.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

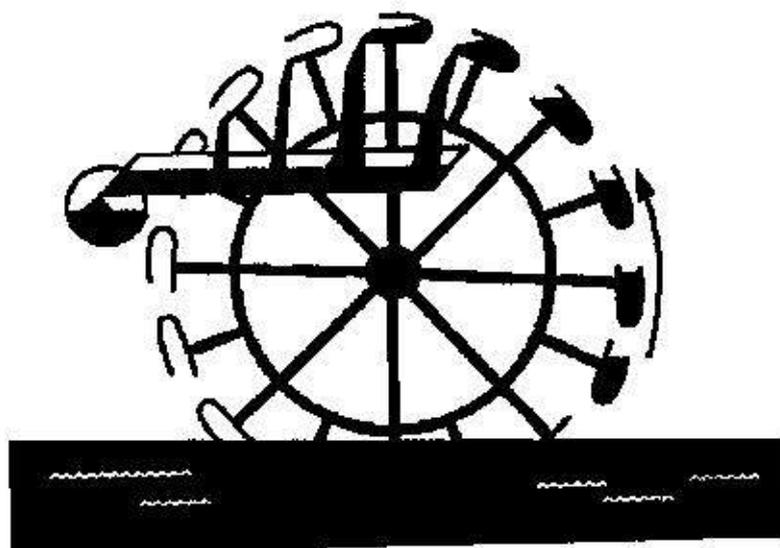
5

1 КРАТКАЯ ИСТОРИЯ НАСОСНОЙ ТЕХНИКИ

С давних времен человечество нуждается в добыче и запасе пресной воды. Эта вода нужна была не только для употребления человеком, но также для полива полей и наполнения фортификационных рвов, окружавших города и замки.

Создателями первых насосов считаются Китай и Египет в 1000 г. до н.э., как показывают археологические раскопки.

Китайское водочерпательное колесо



Направление потока

Рисунок 1 Китайское водочерпательное колесо

На рисунке 1 представлено первое водочерпательное колесо. Модель этого колеса воссоздана по останкам, найденным археологами.

Оригинальное усовершенствование данного устройства было сделано в 1724 г. Джакобом Леопольдом, который присоединил к колесу изогнутые трубы.

При повороте колеса вода двигалась к его оси. Течение воды в реке, в свою очередь, служило приводом для этой подъёмной установки. Особого внимания в этой конструкции заслуживала форма труб. Она поразительно напоминала форму лопастей современных центробежных насосов. Эскиз водяного колеса Джакоба Леопольда представлен на рисунке 2.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

6

Водяное колесо Джакоба Леопольда

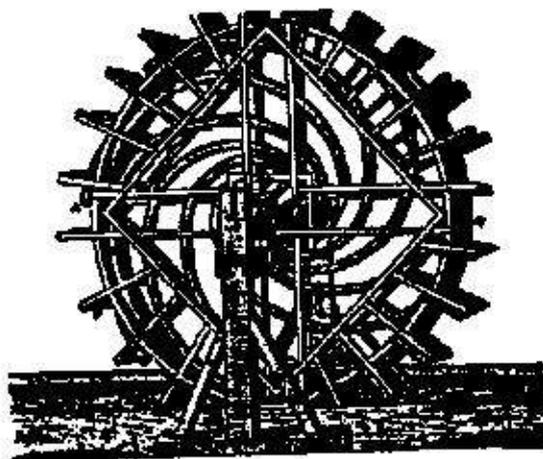


Рисунок 2 Водяное колесо Джакоба Леопольда

Архимед, великий ученый древности, изобрел винтовое водоподъемное устройство, позже названное в его честь. Это устройство поднимало воду с помощью вращающегося внутри трубы винта, но некоторое количество воды всегда стекало обратно, т.к. в те времена эффективные уплотнения были неизвестны. В результате, была выведена зависимость между наклоном винта и подачей. При работе можно было выбирать между большим объемом поднимаемой воды или большей высотой подъема. Чем больше наклон винта, тем больше высота подачи при уменьшении производительности.

Архимедов винт

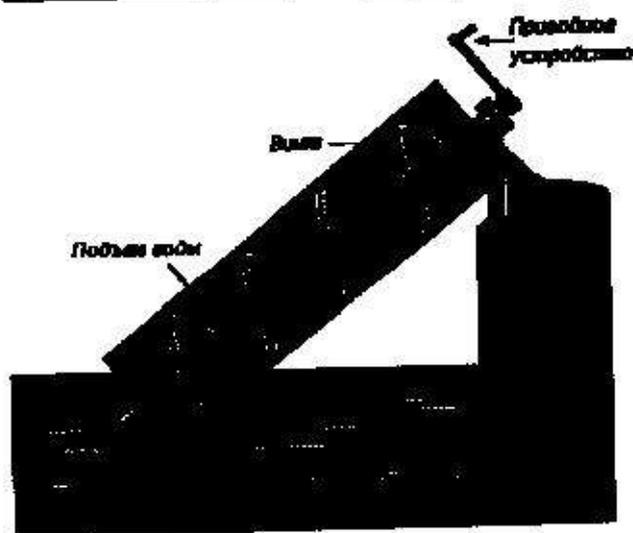


Рисунок 3 Архимедов винт

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

7

При этом принцип работы механизма был очень похож на тот, по которому работают современные центробежные насосы. Характеристика насоса имеет аналогичную зависимость между напором и подачей. Из исторических источников мы знаем, что такие винтовые насосы работали при углах наклона от 37 до 45 градусов. Они обеспечивали подъём воды на высоту от 2 до 6 метров и имели максимальную подачу около 10 метров кубических в час.

По сегодняшний день задача проектирования насосов является актуальной. Однако сегодня эта задача решается в промышленных масштабах.

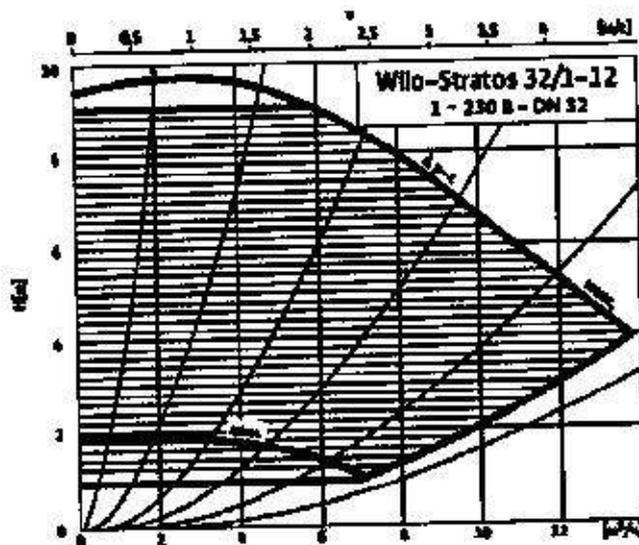
					ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Асинхронные машины составляют порядка 95% всех электрических машин в мире. Широкое использование асинхронных двигателей объясняется их простотой в использовании и обслуживании, а также высокой технологичностью, полученной на фоне массового производства.

С развитием полупроводниковой техники широкое применение нашли частотные преобразователи, позволяющие осуществлять регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Применение частотного преобразователя в совокупности с асинхронным двигателем при работе в качестве насоса позволяет получить характеристики представленные на рисунке 4.

Поле характеристик насоса Wilo-Stratos



Бесступенчатое регулирование частоты вращения у высокоэффективного насоса Wilo-Stratos

Рисунок 4 Характеристика насоса Wilo-Stratos

Таким образом, использование асинхронных двигателей в качестве привода для насосов (в том числе отопительных систем) является более предпочтительным, чем использование других типов электрических машин.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

9

3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

3.1 Выбор главных размеров

Высота оси вращения $h = 0,225$ м;

Внешний диаметр статора – $D_a = 0,4$ м.

Внутренний диаметр статора :

$$D = k_D \cdot D_a, \quad (1)$$

где k_D – коэффициент, характеризующий отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей ($k_D = 0,7$).

$$D = k_D \cdot D_a = 0,7 \cdot 0,4 = 0,28 \text{ (м)}. \quad (2)$$

Полюсное давление τ

$$\tau = \pi \cdot \frac{D}{2 \cdot \rho} = \pi \cdot \frac{0,28}{2 \cdot 3} = 0,147 \text{ (м)}, \quad (3)$$

где $\rho = \frac{60 \cdot f_1}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1000} = 3$ – число пар полюсов, $2\rho = 6$. (4)

Расчетная мощность

$$P = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos\phi} \quad (5)$$

где k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению ($k_E = 0,974$), P_2 – номинальная мощность на валу двигателя.

$$P = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos\phi} = 45 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,974}{0,915 \cdot 0,89} = 53,820 \cdot 10^3 \text{ (Вт)}. \quad (6)$$

Электромагнитные нагрузки

A – электромагнитная нагрузка, ($35 \cdot 10^3$ А/м),

B_δ – индукция в воздушном зазоре, (0,8 Тл).

Обмоточный коэффициент (предварительно для двухслойной обмотки)

$$K_{obl} = 0,92$$

Расчетная длина магнитопровода.

Коэффициент формы поля:

$$K_B = \frac{\pi}{\sqrt{2} \cdot 2} = 1,111 \quad (7)$$

Окружная скорость поля статора:

$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} = \frac{2\pi \cdot 50}{3} = 104,72 \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right) \quad (8)$$

Коэффициент полюсного перекрытия: $\alpha_\delta = \frac{2}{\pi}$

Расчетная длина магнитопровода будет равна:

$$l_\delta = \frac{P}{k_B D^2 k_{об1} B_\delta A \Omega} = \frac{53,8 \cdot 10^3}{1,111 \cdot 0,28^2 \cdot 105 \cdot 0,92 \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0,8} = 0,228 \text{ (м)} \quad (9)$$

Так как расчётная длина сердечника статора не превышает 250 мм, то радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет.

					ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3.2 Определение z_1 , w_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора

Зубцовое деление выбирается в зависимости от типа обмотки, номинального напряжения и полюсного деления машины.

Минимальное и максимального значения соответственно равны: $t_{z1max} = 0,015$ м; $t_{z1min} = 0,012$ м.

Число пазов статора тогда:

$$z_{1min} = \frac{\pi D}{t_{z1max}} = \frac{\pi \cdot 0,28}{0,015} = 58 \quad (10)$$

$$z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{z1min}} = \frac{\pi \cdot 0,28}{0,012} = 73 \quad (11)$$

Примем количество пазов статора равным 72. Тогда количество пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{z_1}{2pt} = \frac{72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 4 \quad (12)$$

Уточним зубцовое деление статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{2ptq_1} = \frac{\pi \cdot 0,28}{2 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 4} = 12,2 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (13)$$

Номинальный ток в обмотке статора:

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{mU_{1ном} \cos(\varphi) \eta} = \frac{45 \cdot 10^3}{3 \cdot 380 \cdot 0,89 \cdot 0,915} = 48,47 \text{ (А)}. \quad (14)$$

Число эффективных проводников в пазу, при 3-х параллельных ветвях:

$$u_p = \frac{\pi D A a}{I_{1ном} z_1} = \frac{\pi \cdot 3 \cdot 0,28 \cdot 35 \cdot 10^3}{48,5 \cdot 72} = 26,45 \quad (15)$$

Округляем число эффективных проводников в пазу до 26.

Число витков в фазе:

$$w_1 = \frac{u_p z_1}{2at} = \frac{26 \cdot 72}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 104 \quad (16)$$

Уточняем значение линейной нагрузки:

$$A = \frac{2I_{1ном} w_1 t}{\pi D} = \frac{2 \cdot 48,5 \cdot 104 \cdot 3}{\pi \cdot 0,28} = 34,4 \cdot 10^3 \left(\frac{\text{А}}{\text{м}} \right). \quad (17)$$

Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{k_g U_{1ном}}{4 \cdot k_B W_1 k_{об1} f_1} = \frac{0,974 \cdot 380}{4 \cdot 1,111 \cdot 104 \cdot 0,92 \cdot 50} = 17,4 \cdot 10^3 \text{ (Вб)}. \quad (18)$$

Коэффициент укорочения:

$$k_y = \sin\left(\frac{5}{6} \cdot \frac{\pi}{2}\right) = 0,96. \quad (19)$$

Приняв коэффициент распределения равным 0,958, получим обмоточный коэффициент:

$$k_{об1} = k_y k_p = 0,96 \cdot 0,958 = 0,92. \quad (20)$$

Индукция в воздушном зазоре:

$$B_\delta = \frac{p\Phi}{Dl_\delta} = \frac{3 \cdot 17,4 \cdot 10^{-3}}{0,28 \cdot 0,23} = 0,81 \text{ (Тл)}. \quad (21)$$

Значения индукции в зазоре и линейной нагрузки находятся в рекомендуемых пределах.

Провод марки ПЭТМ(В): $d_{из} = 1,26 \cdot 10^{-3}$ (м). $q_{эл} = 1,094 \cdot 10^{-6}$ (м).

Количество элементарных проводников примем равным 3.

Плотность тока в обмотке статора:

$$J_1 = \frac{I_{1ном}}{a q_{эл} n_{эл}} = \frac{47,5}{3 \cdot 1,094 \cdot 10^{-6} \cdot 3} = 4,93 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{А}}{\text{м}^2}\right). \quad (22)$$

3.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Возьмём сталь электротехническую 2013, с коэффициентом заполнения пакета 0,97.

Рассчитаем ширину зубца:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta t_{z1} l_\delta}{B_{z1} l_\delta k_{c1}} = \frac{0,81 \cdot 0,0122 \cdot 0,23}{1,6 \cdot 0,23 \cdot 0,97} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (23)$$

Рассчитаем высоту яра статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a l_\delta k_{c1}} = \frac{17,4 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,4 \cdot 0,23 \cdot 0,97} = 27,9 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (24)$$

Предварительно зададимся размерами пазовой зоны: высота шлица паза $h_{шл} = 1 \cdot 10^{-3}$ (м); ширина шлица паза $b_{шл} = 3,7 \cdot 10^{-3}$ (м); высота клиновой части паза $h_{кв} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ (м).

Рассчитаем размеры паза:

$$h_{н1с} = \left(\frac{D_a - D}{2} \right) - h_a = \frac{0,4 - 0,28}{2} - 27,9 \cdot 10^{-3} = 32,1 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (25)$$

$$b_{1с} = \frac{\pi \cdot (D + 2h_{шл} - b_{шл}) - z_1 b_{z1}}{z_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (0,28 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3}) - 72 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3}}{72 - \pi} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (26)$$

$$b_{2с} = \left(\frac{\pi \cdot (D + 2h_{н1с})}{z_1} \right) - b_{z1} = \left(\frac{\pi \cdot (0,28 + 2 \cdot 32,1 \cdot 10^{-3})}{72} \right) - 6,4 \cdot 10^{-3} = 8,6 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (27)$$

Определим высоту паза статора:

$$h_{п.к} = h_{н1с} - \left(h_{шл} + \frac{b_{1с} - b_{шл}}{2} \right) = 32,1 \cdot 10^{-3} - \left(1 \cdot 10^{-3} + \frac{6 \cdot 10^{-3} - 3,7 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 30 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (28)$$

Размеры паза в свету с учётом припуска на сборку:

$$b'_1 = b_{1с} - 0,2 \cdot 10^{-3} = 5,8 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (29)$$

$$b'_2 = b_{2с} - 0,2 \cdot 10^{-3} = 8,4 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (30)$$

$$h'_{п.к} = h_{п.к} - 0,2 \cdot 10^{-3} = 29,8 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (31)$$

Площадь поперечного сечения прокладок для двигателей с высотой оси вращения до 250 мм:

$$S_{пр} = (0,9 \cdot b_{1с} + 0,4 \cdot b_{2с}) \cdot 10^{-3} = (0,9 \cdot 6 \cdot 10^{-3} + 0,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-3} = 8,84 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}. \quad (32)$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу:

$$S_{из} = b_{из} \cdot (2h_{н1с} + b_{1с} + b_{2с}) = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot (2 \cdot 32,1 \cdot 10^{-3} + 6 \cdot 10^{-3} + 8,6 \cdot 10^{-3}) = 31,5 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}. \quad (33)$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки:

$$S_n = \frac{(b_1 + b_2)}{2} \cdot h_{п.к} - S_{из} - S_{пр} \quad (34)$$

$$= \frac{5,8 \cdot 10^{-3} + 8,4 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot 29,8 \cdot 10^{-3} - 31,9 \cdot 10^{-6} - 8,84 \cdot 10^{-6} = 171 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}.$$

Коэффициент заполнения паза:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 u_n n_{эл}}{S_n} = \frac{(1,26 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 26 \cdot 3}{171 \cdot 10^{-6}} = 0,724. \quad (35)$$

Полученное значение коэффициента заполнения паза проводом допустимо при механизированной укладке обмотки. Эскиз паза представлен на рисунке 5.

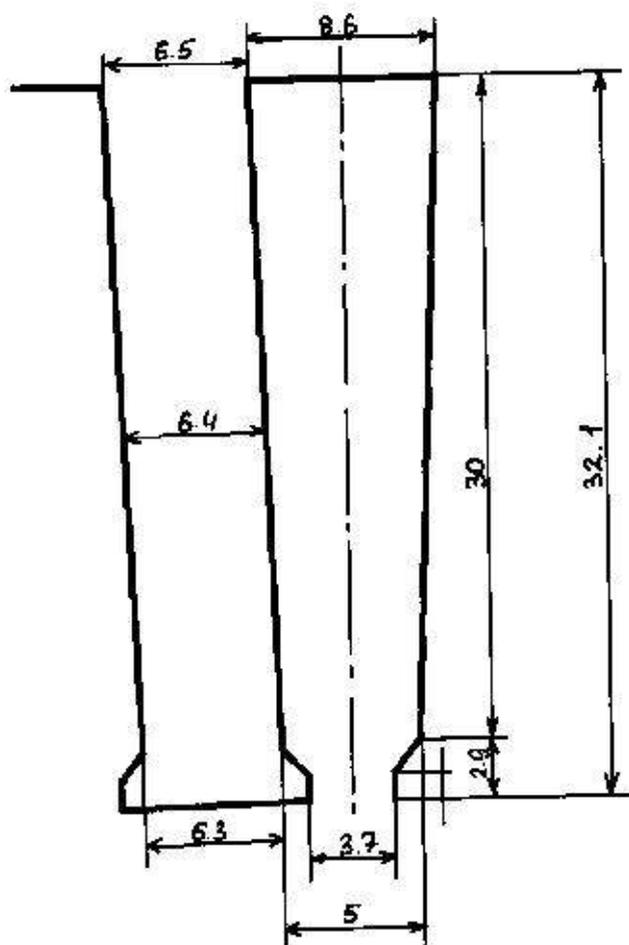


Рисунок 5 Эскиз пазовой зоны

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

15

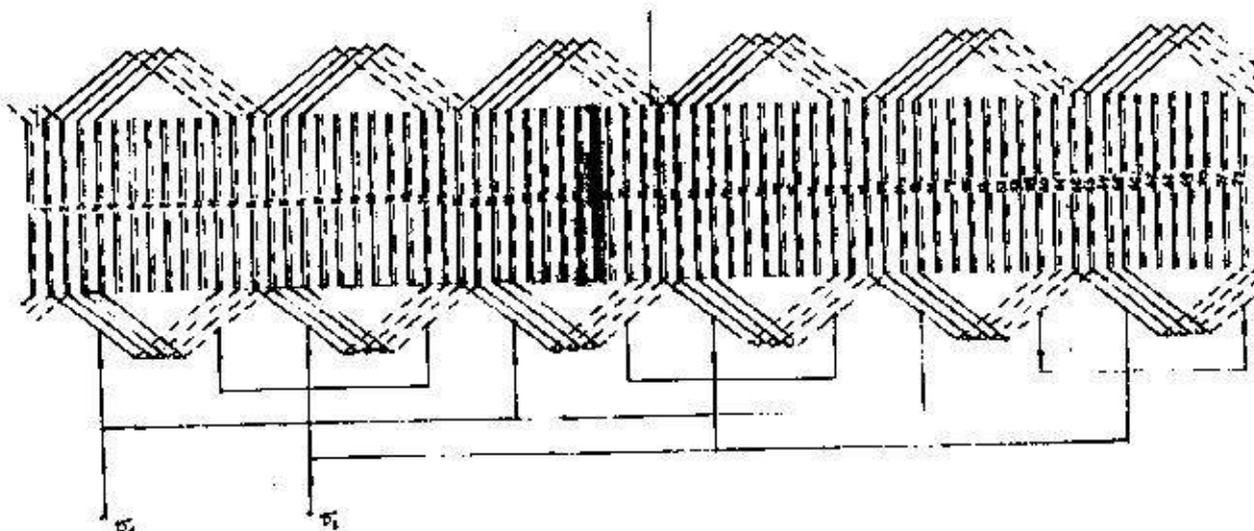


Рисунок 6 Схема обмотки статора (одна фаза)

3.4 Расчёт ротора

Воздушный зазор примем равным: $\delta = 0,6 \cdot 10^{-3}$ (м).

Число пазов ротора выберем 60 со скосом.

Расчитаем внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\delta = 0,28 - 2 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} = 0,279 \text{ (м)}. \quad (36)$$

Длина магнитопровода ротора равна длине магнитопровода статора.

Расчитаем зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,279}{60} = 14,6 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (37)$$

Пакет ротора непосредственно насаживается на вал, поэтому внутренний диаметр пакета ротора равен диаметру вала:

$$D_n = 0,22 \cdot D_n = 0,23 \cdot 0,4 = 90 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (38)$$

Относительный размер, показывающий, на какую часть зубцового деления по дуге окружности зазора изменено направление оси паза по сравнению с её положением при нескошеных пазах:

$$\beta_{ск} = \frac{b_{ск}}{t_{z2}} = \frac{t_{z2}}{t_{z2}} = 1. \quad (39)$$

Коэффициент скоса:

$$k_{ск} = \frac{2 \cdot \sin\left(\beta_{ск} \cdot \frac{p}{Z_2}\right)}{\beta_{ск} \cdot \frac{p}{Z_2} \cdot 2} = 0,99. \quad (40)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Отметим, что коэффициент скоса учитывает уменьшение ЭДС обмотки при скошенных пазах ротора.

Коэффициент приведения токов:

$$V_i = \frac{2m w_1 k_{об1}}{z_2 k_{ск}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 104 \cdot 0,92}{60 \cdot 0,99} = 9,66. \quad (41)$$

Коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение токов статора и ротора:

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos(\varphi) = 0,2 + 0,8 \cdot 0,89 = 0,912. \quad (42)$$

Ток ротора:

$$I_2 = k_i I_{1ном} V_i = 0,912 \cdot 47,5 \cdot 9,66 = 427,34 \text{ (A)}. \quad (43)$$

Примем плотность тока в обмотке ротора: $J_2 = 2,8 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{A}}{\text{м}^2}\right)$.

Площадь поперечного сечения стержня:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{427,34}{2,8 \cdot 10^6} = 152,6 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}. \quad (44)$$

Допустимая ширина зубца ротора:

$$b_{z2доп} = \frac{B_\delta t_{z2} l_\delta}{B_{z2} l_{ст2} k_{с2}} = \frac{0,81 \cdot 14,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,23}{1,8 \cdot 0,23 \cdot 0,97} = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (45)$$

Площадь поперечного сечения стержня:

$$q_{ср} = \frac{\pi}{8} (b_{1р}^2 + b_{2р}^2) + \frac{(b_{1р} + b_{2р}) \cdot h_{1р}}{2} = 153 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}. \quad (46)$$

Плотность тока в стержне:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_{ср}} = \frac{427,34}{153 \cdot 10^{-6}} = 2,79 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{A}}{\text{м}^2}\right). \quad (47)$$

Рассчитаем плотность тока в короткозамыкающих кольцах:

$$J_{кл} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 2,79 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{A}}{\text{м}^2}\right). \quad (48)$$

Площадь поперечного сечения кольца:

$$q_{кл} = \frac{I_2}{J_{кл} 2 \sin\left(\frac{\pi p}{z_2}\right)} = \frac{427,34}{2,79 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot 3}{60}\right)} = 576 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}. \quad (49)$$

Размеры колец:

$$h_{\text{ккл}} = 1,25h_{\text{п2}} = 1,25 \cdot 26 \cdot 10^{-3} = 33 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (50)$$

$$b_{\text{ккл}} = \frac{q_{\text{ккл}}}{h_{\text{ккл}}} = 576 \frac{10^{-6}}{33 \cdot 10^{-3}} = 18 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (51)$$

$$q_{\text{ккл}} = h_{\text{ккл}} b_{\text{ккл}} = 33 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 10^{-3} = 594 \cdot 10^{-6} \text{ (м}^2\text{)}. \quad (52)$$

$$D_{\text{ккл.ср}} = D_2 - h_{\text{ккл}} = 0,279 - 0,033 = 0,246 \text{ (м)}. \quad (53)$$

Эскиз пазовой зоны ротора представлен на рисунке 3.

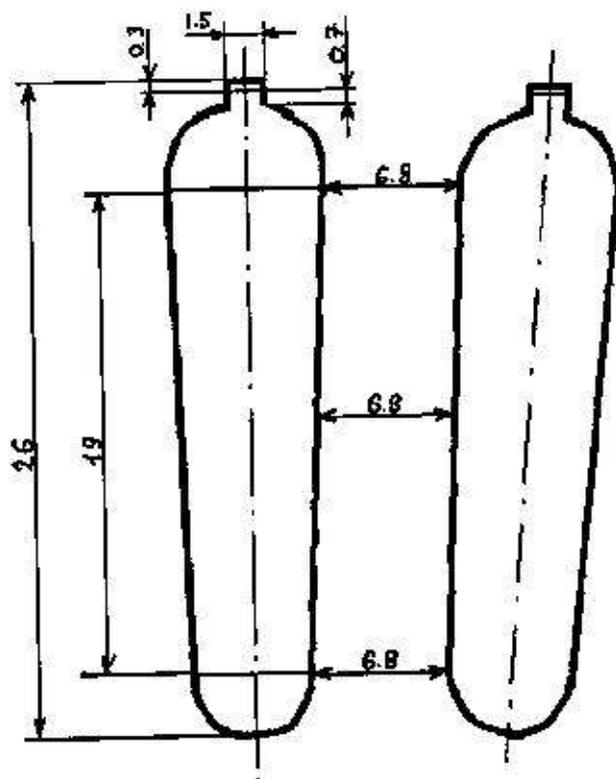


Рисунок 7 Эскиз зубцовой зоны ротора

3.5 Расчёт магнитной цепи

Магнитопровод из стали 2013 с толщиной листов 0,5 мм.

Коэффициент воздушного зазора:

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta} = \frac{12,2 \cdot 10^{-3}}{12,2 \cdot 10^{-3} - 3,4 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}} = 1,2. \quad (54)$$

МДС на проведения потока через воздушный зазор:

$$F_{\delta} = \frac{2B_{\delta} \delta k_{\delta}}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 0,81 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2}{1,26 \cdot 10^{-6}} = 929 \text{ (А)}. \quad (55)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Так как индукция в зубце статора не превышает 1,8 Тл, не нужно учитывать ответвление потока в паз и находить действительную индукцию в зубце. Так как индукция в зубце равна 1,6 Тл, то напряженность поля в зубце равна 962 А/м. МДС зубцовой зоны статора:

$$F_{z1} = 2h_{z1}H_{z1} = 61,8 \text{ (А)}. \quad (56)$$

Так как индукция в зубце ротора равна 1,8 Тл, то напряженность в зубце ротора равна 1890 А/м. МДС зубцовой зоны ротора:

$$F_{z2} = 2h_{z2}H_{z2} = 97,9 \text{ (А)}. \quad (57)$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1,17. \quad (58)$$

Полученное значение коэффициента позволяет предварительно оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины. Коэффициент меньше значения 1,2, что говорит о том, что зубцовая зона мало использована.

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора:

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} = 0,195 \text{ (м)}. \quad (59)$$

Так как индукция в ярме статора равна 1,4 Тл, то магнитное напряжение в ярме статора равно 586 А/м. МДС на проведение потока через ярмо статора:

$$F_a = L_a H_a = 114,3 \text{ (А)}. \quad (60)$$

Индукция в ярме ротора:

$$B_j = \frac{\Phi}{2h_j l_\delta k_{c2}} = 0,57 \text{ (Тл)}. \quad (61)$$

Так как индукция в ярме ротора равно 0,57 Тл, то магнитное напряжение в ярме ротора равно 74 А/м. Длина магнитной силовой линии в ярме ротора:

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p} = 83 \cdot 10^{-3} \text{ (м)}. \quad (62)$$

МДС на проведение потока через ярмо ротора:

$$F_j = L_j H_j = 6,14 \text{ (А)}. \quad (63)$$

Магнитное напряжение на пару полюсов:

$$F_{\mu} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 1183 \text{ (A)}. \quad (64)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{F_{\delta}} = 1,27. \quad (65)$$

Намагничивающий ток:

$$I_{\mu} = \frac{pF_{\mu}}{0,9\pi w_1 k_{об1}} = 12,6 \text{ (A)}. \quad (66)$$

Относительное значение тока намагничивания:

$$I_{\mu'} = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}} = 0,26. \quad (67)$$

Относительное значение тока намагничивания служит определённым критерием правильности произведенного выбора и расчёта размеров и обмотки двигателя. Поскольку полученное значение входит в пределы 0,25..0,35, то размеры машины выбраны правильно, активные материалы полностью используются, двигатель будет иметь высокие КПД и коэффициент мощности, хорошие показатели расхода материалов на единицу мощности.

3.6 Параметры рабочего режима

Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = k_r \rho_{115} \frac{L_1}{q_{3\phi} a} = 0,248 \text{ (Ом)}. \quad (68)$$

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура равна 115 градусов.

Средняя ширина катушки, определяемая по душе окружности, проходящей по серединам высоты пазов:

$$b_{кт} = \beta \frac{\pi(D + h_{н1с})}{2p} = 0,163 \text{ (м)}. \quad (69)$$

Длина лобовой части:

$$L_{л1} = K_{л} b_{кт} + 2B = 1,4 \cdot 0,163 + 2 \cdot 0,01 = 0,248 \text{ (м)}. \quad (70)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Средняя длина витка: (71)

$$l_{cp1} = 2(l_{п1} + l_{л1}) = 0,956 \text{ (м)}.$$

Тогда:

$$L_1 = L_{cp1} w_1 = 100 \text{ (м)}. \quad (72)$$

В проводниках обмотки статора асинхронных машин эффект вытеснения тока проявляется незначительно из-за малых размеров элементарных проводников. Поэтому в расчетах машины, коэффициент увеличения активного сопротивления от действия эффекта вытеснения тока принимаю равным 1.

В этом случае некоторое увеличение потерь от эффекта вытеснения тока относят к добавочным потерям.

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора:

$$r_1' = r_1 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,032. \quad (73)$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + 2 \frac{r_{кл}}{\Delta^2} = 95,7 \cdot 10^{-6} \text{ (Ом)}. \quad (74)$$

Относительное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора:

$$r_2' = r_2 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,023. \quad (75)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$\begin{aligned} X_1 &= 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l_\delta}{pq} (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) \\ &= 15,8 \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{104}{100} \right)^2 \frac{0,23}{3 \cdot 4} (1,93 + 1 + 1,7) = 0,757 \text{ (Ом)}. \end{aligned} \quad (76)$$

Относительное значение индуктивного сопротивления статора:

$$X_1' = X_1 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,097. \quad (77)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$\begin{aligned} X_2 &= 7,9 f_1 l_\delta (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} \\ &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,23 \cdot (2,53 + 0,51 + 1,75 + 0,8 \cdot 10^{-3}) \cdot 10^{-6} \\ &= 4,35 \cdot 10^{-4} \text{ (Ом)}. \end{aligned} \quad (78)$$

Приведем индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора к числу витков статора:

$$X'_2 = X_2 \frac{4m(w_1 k_{об1})^2}{Z_2 k_{ск}^2} = 0,81 \text{ (Ом)}. \quad (79)$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора:

$$X'_2 = X'_2 \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,1. \quad (80)$$

3.7 Расчет потерь

Масса стали яра:

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_\delta k_{c1} \gamma_c = 56,75 \text{ (кг)}. \quad (81)$$

Масса зубцов статора:

$$m_z = h_z b_{z1cp} Z_1 l_\delta k_{c1} \gamma_c = 25,74 \text{ (кг)}. \quad (82)$$

Потери в стали статора магнитные:

$$P_{ст.оси} = \rho_{1.050} \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta (k_{да} B_a^2 m_a + k_{дз} B_{z1}^2 m_{z1}) = 741 \text{ (Вт)}. \quad (83)$$

Удельные поверхностные потери ротора:

$$\rho_{пов2} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n_1}{10000}\right)^{1,5} (\beta_{02} k_\delta B_\delta t_{z1} \cdot 10^3)^2 = 235 \left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}\right). \quad (84)$$

Поверхностные потери в роторе:

$$P_{пов2} = \rho_{пов2} (t_{z2} - b_{ш2}) Z_2 l_\delta = 42,5 \text{ (Вт)}. \quad (85)$$

Масса зубцов ротора:

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2cp} l_\delta k_{c2} \gamma_c = 18,4 \text{ (кг)}. \quad (86)$$

Амплитуда изменения индукции в зубцах ротора:

$$B_{пул2} = B_{z2cp} \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{z2}} = 0,126 \text{ (Тл)}. \quad (87)$$

Пульсационные потери в роторе:

$$P_{пул2} = 0,11 \left(\frac{Z_1 n_1 B_{пул2}}{1000}\right)^2 m_{z2} = 166,5 \text{ (Вт)}. \quad (88)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Суммарные добавочные потери в стали:

$$P_{ст.доб} = P_{пов2} + P_{пул2} = 42,5 + 166,5 = 209 \text{ (Вт)}. \quad (89)$$

Полные потери в стали:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 950 \text{ (Вт)}. \quad (90)$$

Механические потери (коэффициент трения равен 0,78):

$$P_{мех} = k_T \left(\frac{n_1}{10} \right)^2 D_a^4 = 200 \text{ (Вт)}. \quad (91)$$

Потери электрические на холостом ходу:

$$P_{э1х.х} = 3I_\mu^2 r_1 = 118 \text{ (Вт)}. \quad (92)$$

Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1х.х}}{mU_{1ном}} = 0,954 \text{ (А)}. \quad (93)$$

Ток холостого хода:

$$I_{х.х} = \sqrt{I_{х.х.а}^2 + I_\mu^2} = 12,65 \text{ (А)}. \quad (94)$$

Коэффициент мощности на холостом ходу:

$$\cos(\varphi)_{х.х} = \frac{I_{х.х.а}}{I_{х.х}} = 0,075. \quad (95)$$

3.8 Расчет рабочих характеристик

Параметры контура намагничивания:

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн}}{mI_\mu^2} = 1,55 \text{ (Ом)}. \quad (96)$$

$$x_{12} = \frac{U_{1ном}}{I_\mu} - x_1 = 29,4 \text{ (Ом)}. \quad (97)$$

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1,026. \quad (98)$$

Коэффициенты:

$$a' = c_1^2 = 1,052. \quad (99)$$

$$a = c_1 r_1 = 0,254 \text{ (Ом)}. \quad (100)$$

$$b' = 0. \quad (101)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$b = c_1(x_1 + c_1x'_2) = 1,63 \text{ (Ом)}.$$

(102)

Расчет рабочих характеристик, при скольжениях от 0 до 0,4 сведён в таблицу 1.

Таблица 1 - Расчет рабочих характеристик при скольжениях от 0 до 0,4.

№ п/п	Расчетная формула	Раз- ть	Скольжение, S						
			0,005	0,01	0,015	0,02	0,0225	0,025	0,03
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$a'r/s$	Ом	37,2	18,62	12,418	9,313	8,276	7,451	6,2
2	$R = a + a'r/s$	Ом	37,5	18,88	12,67	9,57	8,56	7,7	6,4
3	$X = b + b'r_2/s$	Ом	1,6	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63	1,63
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	37,5	18,95	12,77	9,71	8,68	7,87	6,67
5	$I'_2 = U_1/Z$	-	10,12	20,05	29,74	39,15	43,78	48,24	57
6	$\cos(\varphi_2) = R/Z$	-	0,999	0,996	0,992	0,986	0,98	0,978	0,969
7	$\sin(\varphi_2) = X/Z$	А	0,044	0,086	0,128	0,168	0,19	0,208	0,245
8	I_{1a} $= I_{0a}$ $+ I'_2 \cos(\varphi_2)$	А	10,90	20,76	30,29	39,38	43,7	47,98	56,05
9	I_{1p} $= I_{0p}$ $+ I'_2 \sin(\varphi_2)$	А	13,06	14,35	16,42	19,21	20,9	22,63	26,59
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	17,02	25,24	34,45	43,82	48,46	53,05	62,04
11	$P_1 = 3U_1I_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	12,43	23,67	34,53	44,9	49,82	54,7	63,9
12	$P_{\varphi 1}$	кВт	0,215	0,473	0,883	1,43	1,75	2,093	2,86
13	$P_{\varphi 2}$	кВт	0,057	0,225	0,494	0,856	1,07	1,3	1,816
14	$P_{\text{доб}}$	кВт	0,062	0,118	0,172	0,224	0,25	0,273	0,319
15	$\sum P$	кВт	1,52	2,01	2,74	3,7	4,26	4,86	6,2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
16	P_2	кВт	10,90	21,67	31,79	41,2	45,56	49,85	57,7
17	η	-	0,877	0,915	0,921	0,918	0,915	0,911	0,903
18	$\cos(\varphi)$	-	0,641	0,823	0,879	0,899	0,9	0,904	0,903

Графическое отображение рабочих характеристик представлено на рисунке 8.

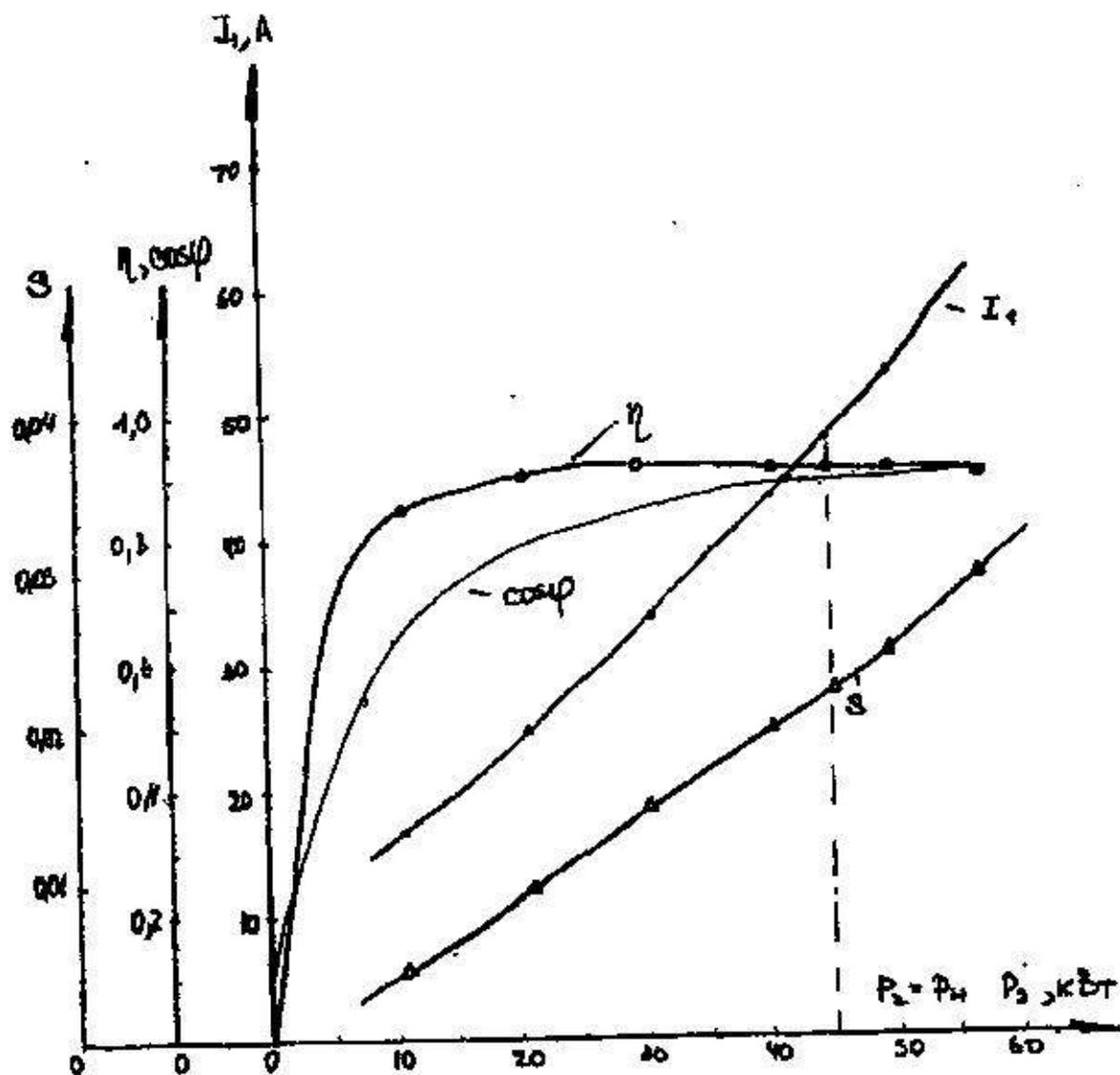


Рисунок 8 Рабочие характеристики двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

25

3.9 Расчет пусковых характеристик с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

При расчёте рабочих характеристик не учитывался эффект вытеснения тока и насыщение магнитной системы вследствие возникновения потоков рассеяния. И это было допустимо, так как в режимах близких к номинальному токи относительно малы и потоки рассеяния не создают заметного падения магнитного напряжения в стали зубцов. При увеличении скольжения свыше критического и в пусковых режимах токи в обмотках возрастают и потоки рассеяния увеличиваются. Коронки зубцов статора и ротора в большинстве случаев оказываются сильно насыщенными.

Насыщение коронок зубцов приводит к увеличению магнитного сопротивления для части потока рассеяния, магнитные линии короткого замыкания через верхнюю часть паза. Потому коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния уменьшается. Несколько снижается также магнитная проводимость дифференциального рассеяния. На коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния насыщения, стали, потоками рассеяния влияние не оказывает.

Коэффициент насыщения примем равным 1,35. Он показывает предполагаемую кратность увеличения тока, обусловленную уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны.

Средняя МДС обмотки статора:

$$F_{н.ср} = 0,7 \left(k_{\beta} + k_{y1} k_{o\delta 1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) \frac{I_1 k_{нас} U_{п1}}{a} = 3787 \text{ (A)}. \quad (103)$$

Электромагнитная постоянная ЭДС:

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 1,014. \quad (104)$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{н.ср} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 3,89. \quad (105)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины равен 0,59.

Уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния, вызванное насыщением от полей рассеяния:

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \left(\frac{h_{ш1} + 0,58h_k}{b_{ш1}} \right) \left(\frac{C_{э1}}{C_{э1} + 1,5b_{ш1}} \right) = 0,17. \quad (106)$$

Тогда магнитная проводимость рассеяния с учетом насыщения от полей рассеяния:

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 1,76. \quad (107)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} k_{\delta} = 1. \quad (108)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учётом влияния насыщения:

$$X_{1нас} = X_1 \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1нас}}{\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}} = 0,615 \text{ (Ом)}. \quad (109)$$

Приведённое индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения:

$$X_{2нас} = X_2 \frac{\lambda_{п2нас} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2нас}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,57 \text{ (Ом)}. \quad (110)$$

Активное и индуктивное сопротивления обмотки ротора с учетом насыщения и вытеснения тока:

$$c_{1пнас} = 1 + \frac{X_{1нас}}{X_{12п}} = 1,016. \quad (111)$$

$$R_{пнас} = r_1 + c_{1пнас} \frac{r_2}{s} = 0,476 \text{ (Ом)}. \quad (112)$$

$$X_{пнас} = X_{1нас} + c_{1пнас} X_2 = 1,19 \text{ (Ом)}. \quad (113)$$

Ток статора и ротора с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения магнитной системы:

$$I_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{пнас}^2 + X_{пнас}^2}} = 297 \text{ (А)}. \quad (114)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$I_{1нас} = I_{2нас} \frac{\sqrt{R_{пнас}^2 + (X_{пнас} + X_{12п})^2}}{C_{1пнас} X_{12п}} = 302 \text{ (A)}. \quad (115)$$

Кратность пускового тока с учетом влияния вытеснения тока и насыщения:

$$I_{п} = \frac{I_{1пнас}}{I_{1ном}} = 6,23. \quad (116)$$

Кратность пускового момента с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения:

$$M_{п} = \left(\frac{I_{2пнас}}{I_{2ном}} \right)^2 k_R \frac{S_{ном}}{s} = 1,24. \quad (117)$$

Результаты расчета пусковых характеристик асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расчет пусковых характеристик с учетом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния.

№ п/п	Расчётная формула	Раз-ть	Скольжение, s					
			1,0	0,8	0,5	0,2	0,1	0,165
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	$k_{нас}$	-	1,35	1,3	1,20	1,10	1,05	1,06
2	$F_{пер}$	А	3787	3592	3212	2557	1843	1952
3	$B_{ф\delta}$	Тл	3,89	3,69	3,30	2,62	1,89	2,00
4	$k_{\delta} = f(B_{ф\delta})$	-	0,59	0,61	0,66	0,80	0,88	0,86
5	$C_{з1}$	мм	3,5	3,3	2,9	1,7	1,0	1,2
6	$\lambda_{п1нас}$	-	1,76	1,76	1,77	1,82	1,86	1,85
7	$\lambda_{д1нас}$	-	1,00	1,04	1,12	1,36	1,49	1,46
8	$X_{1нас}$	Ом	0,615	0,623	0,639	0,686	0,714	0,707
9	$C_{1пнас}$	-	1,016	1,017	1,017	1,018	1,019	1,019
10	$C_{з2}$	мм	5,40	5,12	4,45	2,62	1,57	1,83
11	$\lambda_{п2нас}$	-	1,83	1,83	1,85	1,92	2,01	1,98
12	$\lambda_{д2нас}$	-	1,03	1,07	1,15	1,40	1,54	1,50

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	$X'_{2нас}$	Ом	0,57	0,58	0,59	0,65	0,69	0,68
14	$R_{пнас}$	Ом	0,46	0,535	0,707	1,397	2,548	1,642
15	$X_{пнас}$	Ом	1,19	1,21	1,25	1,35	1,42	1,4
16	$I_{2нас} = U_1 \sqrt{R_{пнас}^2 + X_{пнас}^2}$	А	297	287	265	195	130	142
17	$I_{1нас}$	А	302	291	269	198	133	176
18	$k_{нас} = I_{1нас}/I_1$	-	1,27	1,24	1,18	1,09	1,04	1,16
19	$I_{1*} = I_{1нас}/I_{1ном}$	-	6,23	6,00	5,55	4,09	2,73	3,7
20	M_*	-	1,24	1,25	1,71	2,26	2,05	2,28

Графически пусковые характеристики с учетом насыщения и вытеснения тока представлены на рисунке 9.

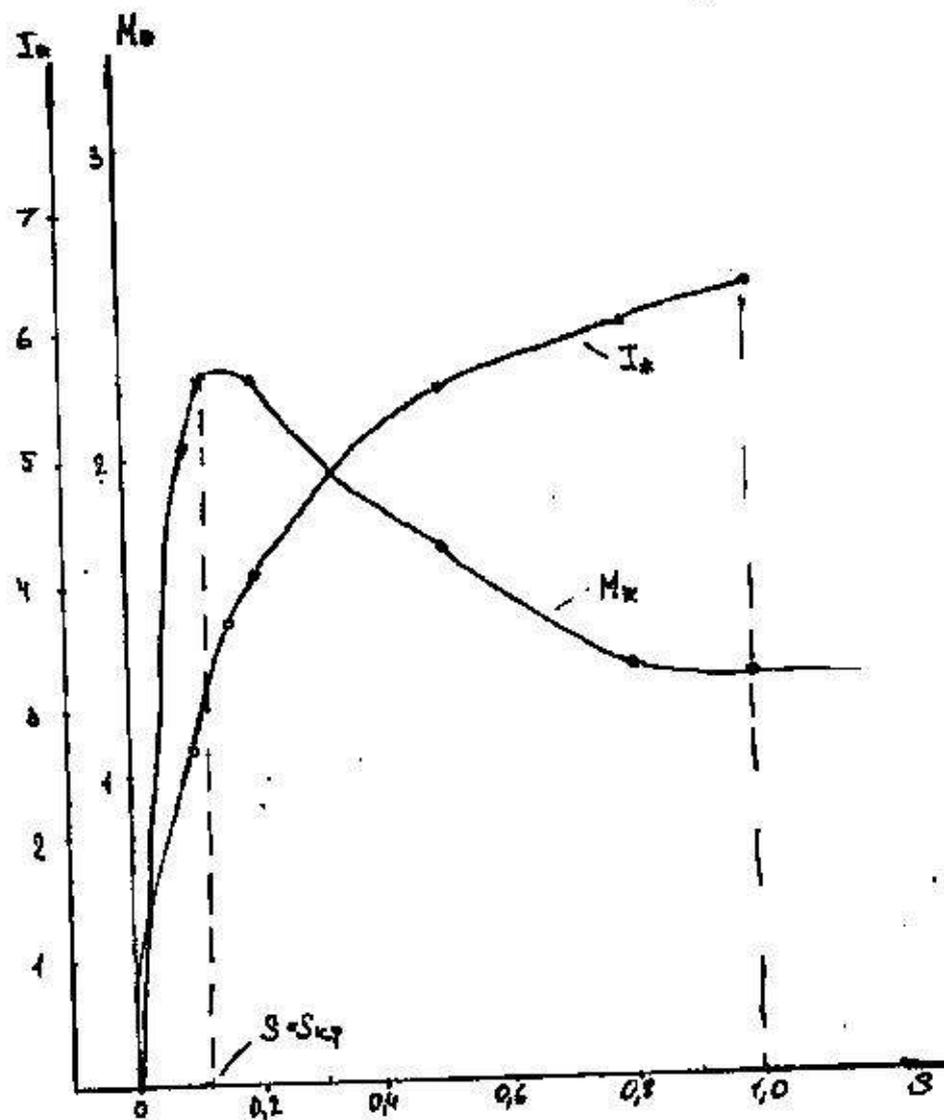


Рисунок 9 Пусковые характеристики асинхронного двигателя с учетом насыщения и вытеснения тока

Критическое скольжение соответствует значению 0,165. Тогда кратность максимального крутящего момента двигателя равна 2,28. Как видно, найденное по характеристикам значение критического скольжение не сильно отличается от определённого ранее.

Спроектированный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям ГОСТ как по энергетическим показателям, так и по пусковым характеристикам.

4 ТЕПЛОВОЙ РАСЧЁТ

Непосредственной задачей теплового расчёта является оценка теплового состояния машины, т.е. определение температур активных частей машины с целью проверки выполнения требований по допустимому уровню нагрева, указанных в техническом задании на проектирование.

Тепловой расчёт произведём на основе метода тепловых схем замещения по общепринятым методикам [4], важнейшей особенностью которых является учёт взаимного воздействия всех частей электрической машины, а также модульность тепловых схем замещения. Тепловые схемы замещения позволяют оценить тепловую напряжённость неоднородных частей электрической машины при любом характере нагрузки и различных условиях теплообмена на поверхности охлаждения, что особенно важно на стадии проектирования.

Определим превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$P_{эл1} = k_p P_{эл} \frac{2l_\delta}{l_{ср1}} = 1,07 \cdot 1750 \frac{2 \cdot 0,23}{0,956} = 901 \text{ (Вт)} \quad (118)$$

$$\Delta v_{пов1} = k \frac{P_{эл1} + P_{ст.осн}}{\pi D l_\delta a_1} = 14,8 \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (119)$$

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора:

$$\Pi_{п1} = 2h_{\tau k} + b_1 + b_2 = 74,6 \cdot 10^{-3} \text{ (м)} \quad (120)$$

Для изоляции класса нагревостойкости F средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции равна $0,16 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$

Исходя из рекомендаций по расчетам, среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки выпной обмотки из эмалированных проводников с учетом неплотности прилегания проводников друг к другу равен $1,2 \text{ (Вт/м}^2\text{C)}$.

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора:

$$\Delta v_{изп1} = \left(\frac{b_{из1}}{\lambda_{экр}} + \frac{b_1 + b_2}{16\lambda_{экр}} \right) \frac{P_{эл1}}{Z_1 \Pi_{п1} l_\delta} = 2,38 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (121)$$

Электрические потери в лобовых частях катушек:

$$P_{эл1} = k_p p_{эл1} \frac{2l_{л1}}{l_{ср1}} = 1,07 \cdot 1750 \cdot \frac{2 \cdot 0,248}{0,956} = 971 \text{ (Вт)}. \quad (122)$$

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta v_{из.л1} = \left(\frac{b_{из.л1}}{\lambda_{экр}} + \frac{h_{п1}}{12\lambda_{экр}} \right) \frac{p'_{эл1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л1}} = 0,87 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (123)$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta v_{пов.л1} = \frac{K P'_{эл1}}{2\pi D l_{выл} a_1} = 10,96 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (124)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя:

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{пов1} + \Delta v_{изл1})2l_\delta + (\Delta v_{изл1} + \Delta v_{пов.л1})2l_{л1}}{l_{ср1}} = 12,2 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (125)$$

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя:

$$\begin{aligned} \sum P'_B &= \sum P + (k_p - 1)(p_{эл1} + p_{эл2}) + (1 - k)(p'_{эл1} + p'_{ст.осн}) \cdot 0,9 \cdot p_{мех} \\ &= 3482 \text{ (Вт)}. \end{aligned} \quad (126)$$

Коэффициент теплосъёма для воздуха равен 22 (Вт/м²С). Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса двигателя:

$$s_{кор} = (\pi D_a + 8\Pi_p)(l_\delta + 2l_{выл}) = 1,91 \text{ (м}^2\text{)}. \quad (127)$$

Тогда превышение температуры корпуса двигателя над температурой окружающей среды:

$$\Delta v_B = \frac{\sum P'_B}{s_{кор} \alpha_B} = 82,8 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (128)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды:

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_B = 97,4 \text{ (}^\circ\text{C)}. \quad (129)$$

Коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором:

$$k_T = m \cdot \sqrt{D_a \frac{n_1}{100}} = 5. \quad (130)$$

Требуемый для охлаждения объём воздуха:

$$\theta_B = \frac{k_T \sum P_B}{1100 \Delta v_B} = 0,19 \left(\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right). \quad (131)$$

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах.

Требуемый для охлаждения объём воздуха находится в допустимых пределах для заданных габаритов.

					ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

5 КОНСТРУКТИВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ДВИГАТЕЛЮ

Согласно требованиям технического задания на проектирование асинхронного двигателя, приложенного к пояснительной записке:

1. Режим работы двигателя – продолжительный S1;
2. Исполнение по способу монтажа – IM1001;
3. Исполнение по степени защиты – IP44;
4. Способ охлаждения и система вентиляции – IC0141;
5. Изоляция класса нагревостойкости – F.

Режим работы двигателя регламентируется ГОСТ Р 52776-2007. Согласно ГОСТ под продолжительным режимом работы понимается режим работы электрической машины с постоянной нагрузкой и продолжительностью, достаточной для достижения практически установившегося теплового состояния. Графически условия продолжительного режима работы показаны на рисунке.

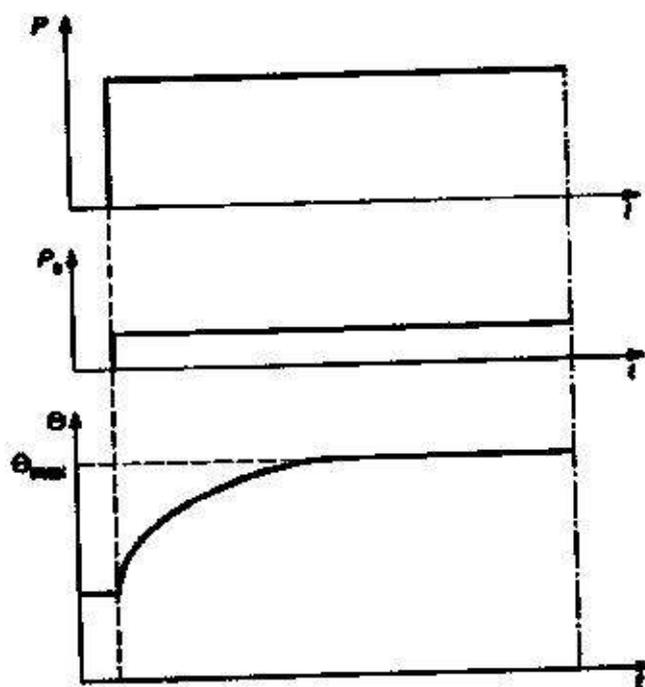


Рисунок 10 - Условия продолжительного режима работы электрической машины.

Изоляция по классам нагревостойкости сортируется в соответствии с ГОСТ ИЕС 60034-18-31-2014. Классу нагревостойкости F соответствует температура 155°C.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

34

Способ охлаждения и система вентиляции электрических машин регламентируется ГОСТ Р МЭК 60034-6-2012. Согласно ГОСТ требуемый способ охлаждения и система вентиляции соответствует закрытой машине, обдуваемой наружным вентилятором, расположенном на валу машины.

Исполнение электрических машин по степени защит регламентируется ГОСТ IEC 60034-5-2011. Согласно ГОСТ машина должна быть защищена от твердых тел размером более 1 мм. Исключено прикосновение (или приближение) к токоведущим частям внутри оболочки проволокой или металлической полоской толщиной более 1 мм. Также машина защищена от разбрызгиваемой воды. Вода, разбрызгиваемая на машину в любом направлении, не должна оказывать вредного воздействия.

Исполнение электрических машин по способу монтажа регламентируется ГОСТ 2479-79. В соответствии с ГОСТ машина должна быть выполнена с двумя подшипниковыми щитами на лапах.

					ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		35

6 ТЕХНОЛОГИЯ СБОРКИ ДВИГАТЕЛЯ

Производство двигателя начинают с получения заготовок. Заготовку вала получают отрезкой круглого проката или поперечно-клиновой прокаткой. Механическую обработку осуществляют на автоматической линии. Листы статора и ротора штампуют из рулонной электротехнической стали на листоштамповочных автоматических установках. Листы ротора собирают на оправку, прессуют, в пазы заливают алюминиевую обмотку с замыкающими кольцами 2 и вентиляционными лопатками 16. Затем оправку выпрессовывают, а в подогретый сердечник 5 запрессовывают вал 6, который удерживается от смещения натягом посадки. После сборки производят механическую обработку наружной поверхности сердечника и шеек вала под посадку подшипников 14. Затем осуществляют динамическую балансировку ротора. Небаланс устраняется добавлением грузов 15 к замыкающему кольцу 2. После напрессовки подшипников 14 ротор готов к сборке двигателя.

Иллюстрации к пояснениям процесса сборки показаны на рисунке.

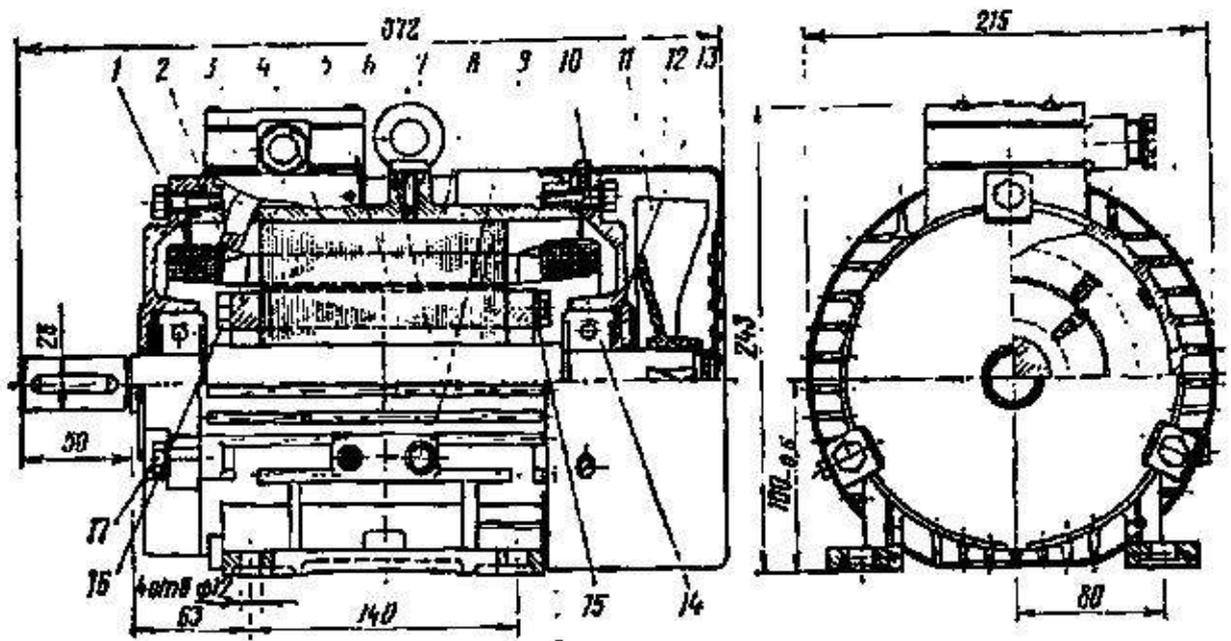


Рисунок 11 Иллюстрация к пояснению сборки двигателя

Листы статора после снятия заусенцев и лакировки собирают на оправку, прессуют и скрепляют скобами или сваркой. Наружная поверхность сердечника

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

36

статора 4 обрабатывается под посадку в станину 8. В обработанный сердечник на специальных станках укладывают в пазы изоляцию, обмотку и клин. Затем припаивают выводные концы, формуют лобовые части 1, скрепляют их биндажом и пропитывают обмотку в лаке. После сушки сердечник готов к сборке. Заготовки корпуса, щитов, коробки выводов, вентилятора получают литьём алюминия в кокиль. Вентилятор может быть отлит также из пластмассы. Механическую обработку литых деталей производят на автоматических линиях или агрегатных станках. Сборка двигателя начинается со сборки статора. В станину 8 запрессовывают сердечник 4. Затем на базе внутреннего диаметра сердечника обрабатывают посадочные поверхности под щит и поверхности лап. Производят сборку коробки выводов 3. В собранный статор заводят ротор. На подшипники надевают щиты 10 и напрессовывают их на посадочные места станины. Щиты крепят болтами 17. Затем устанавливают вентилятор 11, кожух вентилятора 12, болты грузовой 7 и заземления 9. Пружинная шайба 13 поджимает ротор для уменьшения вибрации. Собранный двигатель испытывают, окрашивают, консервируют и упаковывают.

В двигателях больших высот оси вращения, имеющих наружный диаметр сердечника статора более 450-500 мм, сборку сердечника производят непосредственно в станину. При этом последовательность технологического процесса несколько изменяется.

Сборку сердечников производят непосредственно на вал. Для сборки применяют специальные пневматические прессы. Эскиз пневматического прессы показан на рисунке.

Пневматический цилиндр 1 имеет полый шток 2. По основанию прессы передвигается тележка, на рабочей части которой имеются два отверстия, в которые вставляют сменные оправки 5. Ход тележки ограничивается двусторонним упором 4 и фиксатором 6 в положениях, при которых ось оправки правой или левой части тележки совпадает с осью цилиндра. Расстояния между торцом сменного наконечника штока 2 и оправкой 5, ход поршня, усилие прессы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

принимаются в конструкции прессы в зависимости от размеров сердечников, собираемых на прессе.

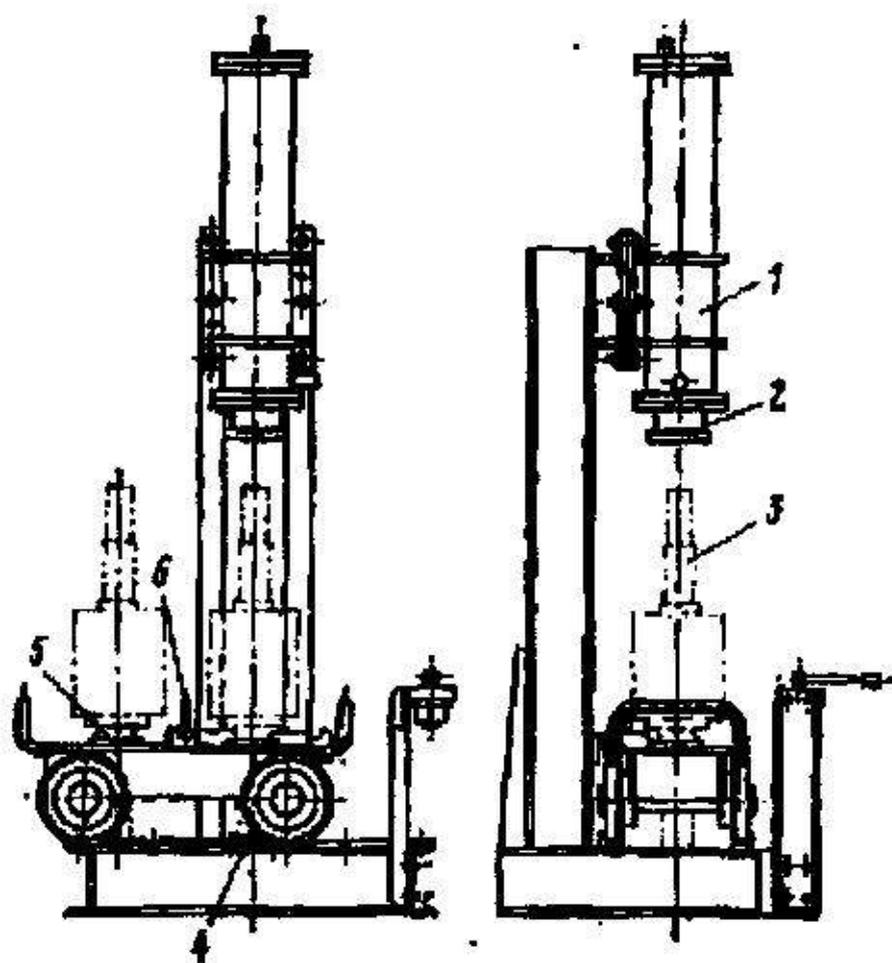


Рисунок 12 Пневматический пресс для сборки сердечников якоря на вал

Сборка сердечника производится в следующем порядке. Вал 3 вставляют в оправку 5 так, чтобы он опирался на её буртик, и надевают нажимную шайбу. Если нажимная шайба должна находиться на валу с натягом, то её напрессовывают на гидравлическом прессе, так как усилия пневматического прессы недостаточно. Затем в шпоночный паз вала устанавливают шпонку, и тележку с валом перемещают в рабочее положение – под пневматический пресс. Из предварительно взвешенных и подобранных по шпонке и шихтовочному знаку листов берут пачку из 50-60 шт, и надевают на вал. Затем включают пресс и производят осаживание листов до нажимной шайбы. Таким образом насаживают остальные листы сердечника. После того как высота собираемого сердечника на валу будет равна 30-40 мм, в 3-4 паза устанавливают пазовые

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

38

клинья, так же как при сборке сердечника статора. Последующие листы при сборке базируют не только по внутреннему диаметру, но и по пазам.

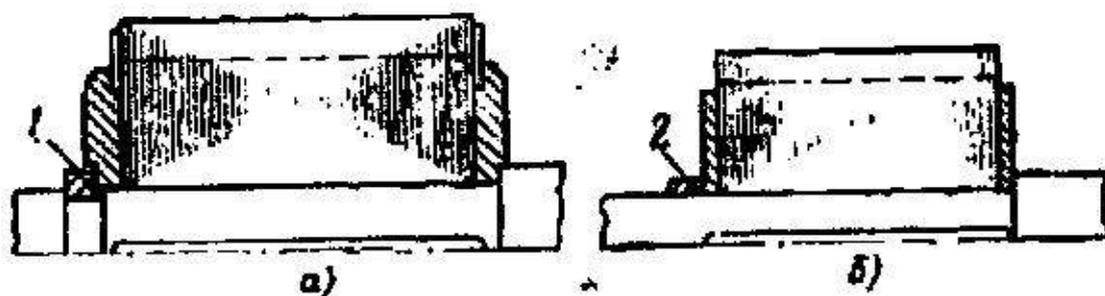


Рисунок 13 К пояснению сборки пакета ротора с валом

После сборки всех листов сердечника надевают верхнюю нажимную шайбу и прессуют сердечник. Затем необходимо произвести крепление сердечника от перемещения в осевом направлении. При креплении двумя полукруглыми шпонками сердечник прессуют и, когда нажимная шайба опустится ниже выточки на валу, в выточку устанавливают две полукруглые шпонки 1. После того как давление будет снято, их приваривают к валу посадкой с натягом, сердечник прессуют, затем надевают на вал предварительно нагретую втулку 2. Давление не снимают до тех пор, пока втулка не остынет.

Заливка ротора алюминием является наиболее прогрессивным технологическим процессом, который позволяет получить обмотку состоящую из стержней в пазу и замыкающих колец, расположенных на торцах сердечника. Заливка алюминия может быть выполнена при любой форме паза. Она обеспечивает хороший контакт между стержнями и кольцами. Вместе с кольцами отливают вентиляционные лопатки, которые отводят теплоту от колец и стержней. В электрических машинах с радиальной вентиляцией лопатки работают как вентиляторы и обеспечивают охлаждение. В некоторых конструкциях роторов на лопатках или кольцах во время балансировки крепят грузы для устранения неуравновешенности ротора.

Для двигателей с повышенным скольжением применяют алюминиевые сплавы с большим удельным сопротивлением.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП

Лист

39

Технологический процесс заливки роторов алюминием является сложным, так как форма алюминиевой обмотки не удовлетворяет требованиям литейного производства. В соединении стержней и колец имеются резкие переходы от тонких стержней к толстым кольцам. В местах резких переходов наблюдаются обрывы стержней в процессе остывания металла. Масса сердечника ротора в несколько раз больше массы алюминия и для того, чтобы алюминий равномерно распределился по всей форме паза, сердечник необходимо нагреть до 350-780 градусов. Нагрев сердечников усложняет и удорожает процесс заливки. В процессе остывания алюминий дает усадку до 2%. Длина роторных стержней уменьшается, и сердечник сжимается. Если перед заливкой сердечник был спрессован слишком сильно, стержень разорвется, а при слишком слабой прессовке сердечника алюминий проникает между листами железа и замыкает их. Кроме того, слабая прессовка сердечника свидетельствует о низком коэффициенте заполнения сердечника сталью, что ухудшает характеристики машины. Сложность заливки также состоит в том, что расплавленный алюминий активно окисляется, и окисная пленка, обладая электроизоляционными свойствами, попадая в пазы и кольца, может привести к обрывам стержней, неполной заливке, образованию трещин. Расплав алюминия следует производить в печах, исключаяющих его насыщение примесями. В раздаточных печах с этой целью обычно используют графитовые тигли.

Для повышения КПД и снижения превышений температуры электродвигателя большое значение имеет контрактное переходное сопротивление между стержнями и сердечником ротора. Контактное сопротивление зависит от способа и режима заливки. Существует несколько способов заливки роторов алюминием. Выбор способа заливки зависит от объема выпускаемых машин, имеющегося оборудования, опыта работы предприятия.

Наиболее производительным способом заливки является, заливка под давлением на специальных литейных машинах. Этим способом заливают 95% роторов электрических машин малой и средней мощности массового и крупносерийного производства. Диаметры роторов, заливаемых под давлением

достигают 200-250 мм. При заливке роторов больших диаметров на существующем оборудовании из-за незначительного объема заливаемого металла не обеспечивается требуемое качество обмотки ротора. Создание больших и сложных литейных машин неоправданно вследствие малых программ выпуска изделий. В этих случаях используют способы заливки под низким давлением: стратегический, вибрационный или центробежный. Для каждого способа существуют свои рекомендации при выборе конструкции ротора и режимов заливки.

Для роторов электрических машин большой мощности применяют обмотки с медными стержнями и замыкающими кольцами. Пусковые обмотки в этом случае изготавливают из медных сплавов с повышенным сопротивлением.

					ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе дипломного проектирования по заданным параметрам был разработан асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 45000 Вт.

Были выбраны главные размеры, рассчитаны параметры обмоток статора и ротора, определена геометрия пазово-зубцовой зоны, были просчитаны параметры рабочего режима двигателя. Также были построены рабочие характеристики двигателя в режимах близких к номинальному. Были построены пусковые характеристики рассчитываемого двигателя. Также был проведён тепловой поверочный расчёт двигателя и определена целесообразность применения изоляции класса нагревостойкости F.

Спроектированный двигатель полностью удовлетворяет требованиям технического задания.

При разработке квалификационной работы были использованы следующие программные средства: AutoCad, MathCad, Microsoft Office, Solid Works.

Система обработки графических изображений AutoCAD позволила создать необходимые эскизы.

Пакет программного обеспечения MathCad обеспечил точность расчётов, а также позволил построить рабочие характеристики генератора.

С помощью Microsoft Office была оформлена пояснительная записка к дипломному проекту согласно СТО ЮУрГУ.

В графическом редакторе Solidworks была создана 3-х мерная модель генератора, проработана конструкция.

					ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кухлинг. X Справочник по физике: учебное пособие / X. Кухлинг. – 1982. – 470 с.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов / И.П. Копылов. – М.: Энергия, 2003. – 496 с.
3. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для вузов / А.И. Вольдек. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
4. Монюшко Н.Д. Тепловой расчёт закрытых электрических машин: учебное пособие / Н.Д. Монюшко, Г.В. Помогаев. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. – 63 с.
5. Каталог ООО «Камский кабель». – <http://www.kamkabel.ru>
6. С.З. Зильберман / Разработка и исследование бесконтактных моментных микродвигателей постоянного тока /Текст Автореф. дис. канд. техн. наук: Специальность 05.09.01 – Электрические машины.
7. ГОСТ 27471 – Машины электрические вращающиеся. Термины и определения
8. ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные производственные факторы»
9. ГОСТ 12.1.003-83 «Шум. Общие требования безопасности»
10. СП4616-88 "Санитарные правила по гигиене труда водителей автомобилей"
11. ГОСТ Р МЭК 60034-14-2008. «Машины электрические вращающиеся. Механическая вибрация электрических машин. Измерения, оценка и пределы вибрации».
12. ГОСТ Р 12.1.019-2009. «Национальный стандарт Российской Федерации. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».
13. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ Электробезопасность. Защитное заземление. Зануление.

					ЮУрГУ - 140400.2016.62.146 ПЗ ВКП	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48