

## Введение

В условиях развития современной энергетики существует ряд актуальных проблем, которыми необходимо задаваться проектировщикам электрических машин. Главными задачами, которые ставятся перед инженерами и разработчиками являются:

1.Сбережение электроэнергии потребляемой электроприводами либо системами в которых работает двигатель.

2.Достижение максимальных параметров качества и надежности.

АД являются основными преобразователями электрической энергии в механическую. В связи с возросшими требованиями к эффективности за счет решения вопросов энергоэффективности и повышения надежности функционирования электрических систем приобретают особую актуальность задачи модернизации АД для улучшения их энергетических характеристик (КПД и коэффициента мощности), получения новых потребительских качеств (совершенствование защиты от окружающей среды, в том числе и герметизация), обеспечение надежности при проектировании, изготовления и эксплуатации АД.

Основные тенденции развития энергетической отрасли говорят, о том, что исторически сложились так, что для улучшения параметров электрических машин проектировщики делают акцент на изменение параметров и варьирование энергетических показателей проектируемых машин.

На сегодняшний день можно утверждать что Россия, как и весь мир, переходят на новые методы проектирования, включаются в работу системы автоматизированного проектирования, берутся в учет экономические показатели, учитываются технологические размеры при производстве.

Взрывозащищенные асинхронные двигатели, предназначенные для работы в составе вентиляторов (вентиляционная установка главного

проектирования) с питанием от стандартной питающей сети 50 Гц напряжением 6000 В должны иметь ряд особенностей:

1. Наличие хорошей вентиляции.
2. Способность к перегрузочным режимам работы.
3. Максимальная надежность в условиях работы.

Проектируемый асинхронный двигатель предназначен для проектирования подземных выработок.

Особенности проектируемого двигателя – предлагается сварная конструкция станины, сварная конструкция короткозамкнутой обмотки ротора, выполненной из меди.

Конструкция сварной станины значительно облегчает вес всего двигателя, дает возможность ремонта станины при её механических повреждениях либо отколе одной или нескольких частей.

Сварная короткозамкнутая обмотка ротора из меди позволит уменьшить номинальное скольжение двигателя и тем самым улучшить его энергетические показатели и сделать данный двигатель более энергоэффективным.

# 1. Электромагнитный расчет

Техническое задание:

Спроектировать взрывозащищенный трёхфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором: номинальная мощность  $P_2 = 200000$  Вт; номинальное напряжение  $U_{ном} = 6000$  В; частота напряжения сети  $f = 50$  Гц; число фаз  $m = 3$ ; высота оси вращения  $h = 355$  мм; число полюсов  $2p = 4$ ; конструктивное исполнение **IM1002**; исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды **IP54**.

## 1.1 Обоснование и выбор основных размеров

Данный расчёт производится по методике произведенной в [1].

1.1.1 Выбираем наружный диаметр статора  $D_a$  [1].

При  $h = 355$  мм  $D_a = 0,66$  м.

1.1.2 Внутренний диаметр статора (1):

$$D = D_a \cdot K_d,$$

где  $K_d$  - коэффициент, характеризующий отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей при различных числах полюсов [1]: ( $K_d = 0,67$ ).

$$D = 0,66 \cdot 0,67 = 0,442 \text{ м.}$$

Принимаем  $D = 0,44$  м.

1.1.3 Полюсное деление  $\tau$ :

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 0,44}{4} = 0,345 \text{ м.}$$

1.1.4 Расчетная мощность (1):

$$P_1 = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \varphi},$$

где  $k_E$  - коэффициент ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению.

Выбираем  $k_E = 0,97$  [1],

$\eta$  - КПД двигателя принимаем  $\eta = 0,9$  (1),

$\cos \varphi$  - коэффициент, принимаем  $\cos \varphi = 0,85$ .

$$P_1 = \frac{P_2 \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{200000 \cdot 0,97}{0,9 \cdot 0,85} = 253595 \text{ Вт}$$

1.1.5 Предварительный выбор электромагнитных нагрузок  $a$  [1]:

Линейная нагрузка  $A = 25 \cdot 10^3 \text{ А / м}$ .

Индукция в зазоре  $B_\delta = 0,82 \text{ Тл}$ .

1.1.6 Выбираем обмоточный коэффициент для двухслойной обмотки (при  $2p = 4$ ):

$$K_{об1} = 0,9.$$

1.1.7 Расчетная длина магнитопровода [1]:

$$l_\delta = \frac{P_1}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{об} \cdot A \cdot B_\delta},$$

где  $k_B$  - коэффициент формы поля рассчитывается по формуле:

$$k_B = \pi / 2\sqrt{2} = 3,14 / 2\sqrt{2} = 1,11,$$

$\Omega$  - синхронная угловая частота вала:

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot 3,14 \cdot \frac{50}{2} = 157 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

$$l_{\delta} = \frac{P_1}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{06} \cdot A \cdot B_{\delta}} = \frac{200000}{1,11 \cdot 0,44^2 \cdot 157 \cdot 0,9 \cdot 25 \cdot 10^3 \cdot 0,82} = 0,406 \text{ м.}$$

Принимаем  $l_{\delta} = 0,4 \text{ м.}$

Критерием правильности выбора главных размеров служит соотношение, определяемое по формуле:

$$\lambda = l_{\delta} / \tau = 0,4 / 0,345 = 1,16.$$

Полученное значение входит в область рекомендуемых пределов в зависимости от  $2p = 4 \quad h = 355 \text{ мм [1]} \quad (0,5:2,2)$ , что подтверждает правильность произведенных расчётов. На этом выбор основных размеров заканчивается. Для дальнейшего расчёта необходимо определить полностью конструктивную длину и длину стали сердечников статора и ротора.

## 1.2 Расчёт зубцовой зоны и обмотки статора

### 1.2.1 Выберем предельные значения зубцового деления $t_{Z1}$ [1]:

При открытых прямоугольных пазах и  $U_H = 6 \text{ кВ.}$

$$t_{Z1min} = 0,023 \text{ м ; } t_{Z1max} = 0,034 \text{ м.}$$

### 1.2.2 Возможное число пазов статора $Z_1$ (1):

$$t_{Z1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1max}} = \frac{3,14 \cdot 0,44}{0,034} = 40,65.$$

$$t_{Z1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1min}} = \frac{3,14 \cdot 0,44}{0,023} = 60,1$$

Выбираем окончательно число пазов статора  $Z_1 = 60$ . Выбор обосновывается тем, что число пазов статора в большинстве асинхронных двигателей должно быть кратно числу фаз, а число пазов на полюс и фазу ( $q$ ) - целым. Обмотки с дробным числом  $q$  при сравнительно небольших числах пазов и полюсов, характерных для большинства асинхронных

двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Большое количество пазов приводит к улучшению рабочих характеристик, но и одновременно к увеличению расхода меди, т.е. стоимость машины при этом повышается.

Проверим величину  $q$  :

$$q = Z_1 / 2p \cdot m = 60 / 4 \cdot 3 = 5 .$$

Обмотка двухслойная.

1.2.3 Окончательное значение зубцового деления статора (1):

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot m \cdot q} = \frac{3,14 \cdot 0,44}{4 \cdot 3 \cdot 5} = 0,023 \text{ м.}$$

Номинальный фазный ток обмотки статора [1]:

$$I_{1\text{НОМ}} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1\text{НОМ}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{200000}{3 \cdot 3465 \cdot 0,85 \cdot 0,9} = 25,15 \text{ А.}$$

Для этого предварительно при условии, что число параллельных ветвей обмотки

$a = 1$  рассчитаем [1]:

$$U_{\text{П1}} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1\text{НОМ}} \cdot Z_1} = \frac{3,14 \cdot 0,44 \cdot 25 \cdot 10^3}{25,15 \cdot 60} = 22,9$$

Принимаем  $a = 1$  тогда значение числа проводников в разе, [1]:

$$U_{\text{П}} = a \cdot U_{\text{П1}}.$$

Окончательно принимаем  $U_{\text{П}} = 22$  .

1.2.4 Число витков в фазе обмотки статора [1]:

$$w_1 = \frac{U_{\text{П}} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{22 \cdot 60}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 220.$$

1.2.5 Найдём окончательное знание линейной нагрузки [1]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{\text{ном}} \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 25,15 \cdot 220 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,44} = 24 \cdot 10^3 \text{ А м}.$$

Полученное значение сопоставляем с рекомендуемым (рисунок 9.22-9.24), оно попадает в заданный интервал.

Рассчитаем значение потока [1]:

$$\Phi = \frac{K_E \cdot U_{\text{ном}}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot K_{\text{об1}} \cdot f_1} = \frac{0,97 \cdot 3465}{4 \cdot 1,11 \cdot 220 \cdot 0,9 \cdot 50} = 7,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}.$$

Определим значение индукции в воздушном зазоре [1]:

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p}{D \cdot l_\delta} = \frac{7,5 \cdot 10^{-2}}{0,44 \cdot 0,4} = 0,86 \text{ Тл}$$

Значения  $A$  и  $B_\delta$  находятся в допустимых пределах (5%).

1.2.6 С точки зрения повышения использования активных материалов плотность тока должна быть выбрана как можно большей, но при этом возрастают потери в меди обмотки. Увеличение потерь сказывается, во-первых, повышении температуры обмотки и во-вторых, на КПД двигателя. Определим допустимую плотность тока в обмотке статора с учётом линейной нагрузки двигателя [1]:

$$J_1 = \frac{AJ}{A}$$

где  $AJ$  - среднее значение тепловой нагрузки [1] зависит от  $D_a$ ;

$$AJ = 110 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3.$$

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{110 \cdot 10^9}{24 \cdot 10^3} = 4,58 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

1.2.7 Площадь поперечного сечения эффективного проводника предварительно [1]:

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{a \cdot J_1} = \frac{25,15}{1 \cdot 4,58 \cdot 10^6}$$

Принимаем число элементарных проводников  $n_{\text{эл}} = 1$  тогда [1]

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = \frac{5,49 \cdot 10^{-6}}{1} = 5,49 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

1.2.8 Утонченное значение плотности тока в обмотке статора [1]:

$$J_1 = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = \frac{25,15}{1 \cdot 5,49 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 4,58 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Плотность тока в обмотке статора попадает с достаточной степенью точности в полученное предварительно значение, что является критерием правильности произведенных расчётов.

1.3 Расчёт зубцовой зоны статора и воздушного зазора

1.3.1 Выбор формы паза статора.

Выбираем открытый прямоугольный ПАЗ статора (Рисунок 1).

Выбираем допустимые значения индукции [1]: в ярме статора -  $B_a = 1,45$  Тел; в зубцах статора при постоянном сечении -  $B_{Z1} = 2,1$  Тел. Выбираем способ изолирования листов - лакирование тогда коэффициент заполнения сердечника сталью для статора  $k_c = 0,95$  [1].

1.3.3 Определим ширину зубцов статора [1]:

$$b_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{Z1}}{B_{Z1} \cdot l_{cm} \cdot k_c} = \frac{0,86 \cdot 0,4 \cdot 23 \cdot 10^{-3}}{2,1 \cdot 0,4 \cdot 0,95} = 9,92 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Найдём высоту ярма статора [1]:

$$h_a = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot k_c}{2 \cdot B_a \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0,86 \cdot 0,4 \cdot 23 \cdot 10^{-3} \text{ м.}}{2 \cdot 1,45 \cdot 0,4 \cdot 0,95} = 0,068 \text{ м.}$$

Высота шлица  $h_a = 0,1 \cdot 10^{-3}$  м для двигателей с  $h = 355$  мм.

Ширина шлица  $b_{\text{ш}} = 13,1 \cdot 10^{-3}$  м [1]:

Определим размеры паза в штампе [1]:

Высота открытого паза

$$h_{\text{п}} = \frac{D_a - 2h_a - D}{2} = \frac{0,66 - 2 \cdot 0,068 - 0,44}{2} = 0,041 \text{ м.}$$

Ширина открытого паза

$$b_n = t_{z1} - b_{z1} = 0,023 - 0,00992 = 0,0131 \text{ м}$$

Высота клина:  $h_{\text{кл}} = 3 \cdot 10^{-3}$  м.

1.3.4

Размеры паза в свету с учётом припуска на шихтовку сердечника [1]:

$$\Delta b = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м; } \Delta h = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

$$b'_{n1} = b_n - \Delta b = (13,1 - 0,3) \cdot 10^{-3} = 12,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$h'_n = h_n - \Delta h = 0,0414 - 0,3 \cdot 10^{-3} = 0,0411 \text{ м}$$

Одностороннюю толщину изоляции в пазу [1]  $b_{\text{из}} = 3,2 \cdot 10^{-3}$  м. м.

Толщина межслойной прокладки  $\Delta_{\text{пр}} = 0,4 \cdot 10^{-3}$  м. м.

Площадь поперечного сечения прокладки:

$$S_{\text{пр}} = b_n \cdot \Delta_{\text{пр}} = 0,0131 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} = 5,24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Высота паза статора, занятая обмоткой:

$$\begin{aligned} h_{\text{нм}} &= h_n - h_{\text{кл}} - h_{\text{ш}} - h_{\text{из}} - \Delta_{\text{пр}} \\ &= 0,0414 - 0,003 - 0,001 - 4 \cdot 0,0032 - 0,0004 = 0,024 \text{ м.} \end{aligned}$$

Ширина паза статора, занятая обмоткой:

$$h_{\text{нм}} = b'_{n1} - 2 \cdot b_{\text{из}} = 0,0128 - 2 \cdot 0,032 = 6,41 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Размеры проводника обмотки статора (первое приближение):

Ширина проводника  $b_{m1} = b_{мп} = 6,41 \cdot 10^{-3}$  м.

Высота проводника

$$a_{m1} = \frac{h_{пм} - U_n \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{U_n} = \frac{0,024 - 22 \cdot 0,3 \cdot 10^{-3}}{22} = 7,94 \cdot 10^{-4} \text{ м.}$$

Сечение проводника  $S_{m1} = a_{m1} \cdot b_{m1} = 7,98 \cdot 10^{-4} \cdot 6,41 \cdot 10^{-3} = 5,12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Размеры проводника обмотки статора (1):

Ширина проводника  $b_{m1} = 6,3 \cdot 10^{-3}$  м.

Высота проводника  $a_{m1} = 0,8 \cdot 10^{-3}$  м.

Сечение проводника  $S_{m1} = 4,903 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ .

Двухсторонняя толщина изоляции медного провода

$$\Delta_{изп} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Уточняем размеры паза статора

Ширина паза

$$b_{n1} = b_{m1} + 2 \cdot b_{из} + \Delta_{изп} = 6,3 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} + 0,33 \cdot 10^{-3} = 0,013 \text{ м.}$$

Высота паза статора, занятая обмоткой с изоляцией:

$$\begin{aligned} h_{l1} &= U_n (a_{m1} + \Delta_{изп}) + 4 \cdot b_{из} + 2 \cdot \Delta_{пр} \\ &= 22 \cdot (0,8 \cdot 10^{-3} + 0,33 \cdot 10^{-3}) + 4 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,4 \cdot 10^{-3} \\ &= 0,0385 \text{ м.} \end{aligned}$$

Полная высота паза статора

$$h_{n1} = h_{l1} + h_{кл} + \Delta_{пр} + h_{ш} = 0,0385 + 0,003 + 0,1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} = 0,0429 \text{ м.}$$

Площадь изоляции в разу статора

$$\begin{aligned}
S_{из} &= b_{из} \cdot (2 \cdot h_{n1} - 2 \cdot h_{кл} + 2 \cdot (b_{n1} - 2 \cdot b_{из}) + 2 \cdot b_{n1}) + S_{пр} \\
&= 3,2 \cdot 10^{-3} \\
&\cdot (2 \cdot 0,429 - 2 \cdot 3 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot (0,013 - 2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3}) + 2 \cdot 0,013) \\
&+ 5,26 \cdot 10^{-6} = 3,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2
\end{aligned}$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки.

1.3.5 Подсчитаем коэффициент заполнения паза:

$$k_3 = \frac{S_{M1} \cdot U_n \cdot n_{эл}}{S_n} = \frac{4,903 \cdot 10^{-6} \cdot 22 \cdot 1}{116,4 \cdot 10^{-6}} = 0,93$$

Полученное значение соответствует коэффициенту заполнения обмоткой открытых пазов статора (0,93 - 0,98).

Таблица 1 - Размеры паза статора

hш	bш	bn	Δизп	Δпр	биз	hкл	h.n
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
1	13	13	0,33	0,4	3,2	3	42,9

Таблица 2 - Перечень изоляции паза статора

Поз.	Назначение изоляции	Материал
1	Витковая	Собственная изоляция провода
2	Корпусная	Полотно стеклослюдинитовое
3, 4, 5	Прокладка	Стеклотекстолит
6	Клин пазовый	Стеклопластик

Масштаб 1:2.5

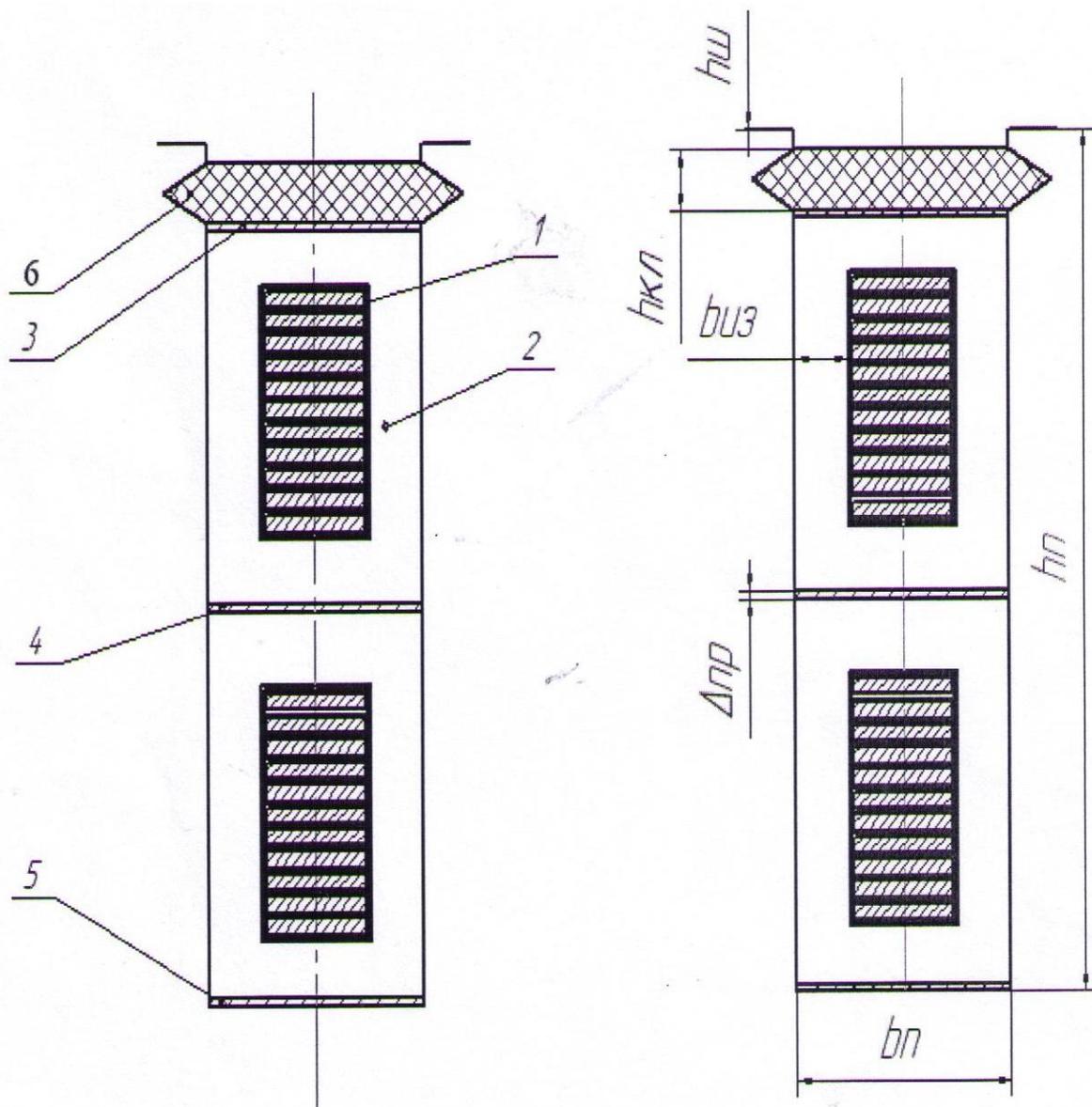


Рисунок 1 - Прямоугольный ПАЗ статора

## 1.4. Расчет ротора

Правильный выбор воздушного зазора  $\delta$  во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющее основную часть МДС магнитной цепи всей машины. Поэтому уменьшение зазора приводит к соответственному уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя, благодаря чему возрастает его  $\cos \varphi$ , и уменьшаются потери в меди обмотки статора. Но чрезмерное уменьшение  $\delta$  приводит к возрастанию амплитуды пульсаций индукции в воздушном зазоре и как следствие этого к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше. Необходимо также учесть условие механической прочности так чтобы прогиб вала не привёл к касанию сердечников ротора и статора.

Для двигателей мощностью 200 кВт и числом полюсов  $2p=4$ , воздушный зазор определяется по рис. 9.31 [1 с.367]  $\delta=2$  мм.

Выбор числа пазов ротора особо важен, так как в поле воздушного зазора машины кроме основной гармоники, присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора. Поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В зависимости от соотношения  $Z_1$  и  $Z_2$  в той или иной степени проявляются синхронные или асинхронные моменты от высших гармоник. Их влияние на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента. В поле зазора присутствуют также высшие гармоники, порядок которых определенным образом связан с числами пазов и полюсов машины. Эти зубцовые гармоники вызывают шум и вибрацию при работе двигателя в номинальном

режиме. Их влияние особо заметно при малых воздушных зазорах. Наилучшие сочетания  $Z_1$  и  $Z_2$ , сведены в таблицу [9-18 1 с. 373].

В двигателях малой мощности обычно выполняют  $Z_1 > Z_2$ . Это связано с технологией изготовления, а также с тем, что с увеличением  $Z_2$  ток в стержня ротора уменьшается и в двигателях небольшой мощности их сечения становятся очень малыми.

Число пазов ротора [1] зависит от числа пазов статора  $Z_1$  и полюсов  $2p$  двигателя. Согласно рекомендациям выбираем число пазов ротора  $Z_2 = 50$ .

1.4.1 Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,44 - 2 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} = 0,437 \text{ м.}$$

1.4.2 Расчетная длина магнитопровода ротора  $l_2 = l_d = 0,4$  м.

1.4.3 Зубцовое деление ротора

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 0,437}{50} = 0,027 \text{ м. м.}$$

1.4.4 Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается а вал [1]:

$$D_J = D_B = k_B \cdot D_a = 0,23 \cdot 0,66 = 0,151 \approx 0,15 \text{ м.}$$

где  $k_B = 0,23$  - эмпирический коэффициент [1] зависит от  $h$  и  $2p$ .

1.4.5 Ток в стержне ротора [1]:

$$I_2 = k_i \cdot I_{1\text{ном}} \cdot v_i$$

где  $k_i$  - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение  $I_1/I_2$ : [1]:

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,85 = 0,88.$$

$v_i$  - коэффициент проведения токов [1]:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 220 \cdot 0,9}{50} = 24.$$

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 0,88 \cdot 25,25 \cdot 24 = 531,62 \text{ А.}$$

1.4.6 Площадь поперечного сечения стержня предварительно [1]:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2}$$

Где  $J_2 = 3,5 \cdot 10^6$  А/м<sup>2</sup> - плотность тока в стержня ротора [1];

тогда:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{531,62}{3,5 \cdot 10^6} = 151,89 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

1.4.7 Выбираем пазы ротора прямоугольной формы. Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым характеристикам двигателя и его мощностью. В асинхронных двигателях мощностью 200 кВт обычно выполняют прямоугольные закрытые пазы и сварная КЗ обмотка ротора из меди. Выбираем допустимую индукцию для зубцов ротора [1]  $B_{Z2} = 2,1$  Тел.

Допустимая ширина зубца [1]:

$$b_{Z2\text{доп}} = \frac{B_\delta \cdot l_\delta \cdot t_{Z2}}{B_{Z2} \cdot l_{cm} \cdot k_c} = \frac{0,86 \cdot 0,4 \cdot 0,027}{2,1 \cdot 0,4 \cdot 0,97} = 11,6 \text{ мм.}$$

Высота перемычки закрытого паза (рисунок 2):

$$h_{\text{пр}} = 1 \cdot 10^{-3}$$

Размеры лица:

Ширина  $b_{ш2} = 0$  м.

Высота  $b_{ш2} = 0$  м.

Минимальная ширина паза ротора

$$b_{n2} = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Высота паза ротора

$$h_{n2} = \frac{\pi \cdot D_2 - Z_2 \cdot (b_{Z2\text{доп}} + b_{n2})}{2\pi} = \frac{3,14 \cdot 0,44 - 50 \cdot (0,0116 + ,012)}{2 \cdot 3,14} = 0,031 \text{ м.}$$

Высота стержня:  $h_c = h_{n2} - h_{ш2} - h_{pe} = 0,031 - 0 - 0,001 = 0,03$  м.

Размеры стержня:

Ширина стержня  $b_c = 0,01$  м.

Высота стержня  $h_c = 0,03$  м.

Сечение стержня  $q_c = h_c \cdot b_c = 0,03 \cdot 0,01 = 3 \cdot 10^{-4}$  мм<sup>2</sup>.

Плотность тока в стержне:  $J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{537,62}{3 \cdot 10^{-4}} = 1,77 \cdot 10^6 \frac{A}{м^2}$ .

Уточняем размеры паза ротора

Высота паза ротора

$$h_{n2} = h_c + h_{pr} + \Delta h = 0,03 + 0 + 0,001 + 0,0003 \\ = 0,0313 \text{ м.}$$

Принимаем  $h_{n2} = 0,0315$  м.

Ширина паза ротора  $b_{n2} = 12 \cdot 10^{-3}$  м.

1.4.8 Уточняем ширину зубцов ротора

Ширина максимальная

$$b_{z2max} = \pi \cdot \frac{D_2 - (h_{ш2} + h_{pr})}{Z2} = \pi \cdot \frac{0,437 - 2(0 + 0,001)}{50} = 0,0154 \text{ м.}$$

Ширина минимальная

$$b_{z2min} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2h_{n2}}{Z2} - b_{n2} = \pi \cdot \frac{0,437 - 2 \cdot 0,0315}{50} - 0,01 = 0,0115 \text{ м}$$

Таблица 3 – Размер паза ротора

$h_{n2}$	$b_{n2}$	$b_c$	$h_{pr}$	$h_c$	$b_{ш2}$	$h_{ш2}$
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
31,5	12	10	1	30	0	0

Масштаб 1:2.5

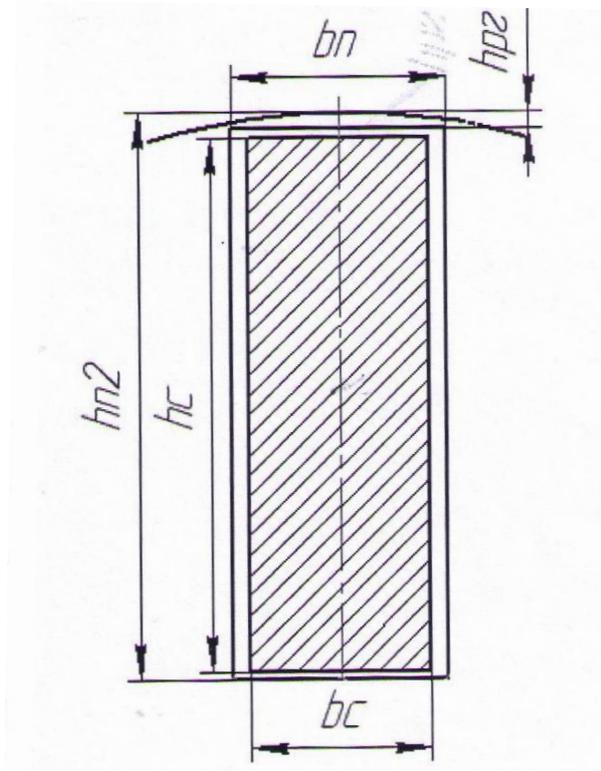


Рисунок 2 – Прямоугольный паз ротора

1.4.9 Короткозамыкающие кольца:

Ток в короткозамкнутом кольце [1]:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{\Delta}$$

где  $\Delta$  - коэффициент [1]:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3.14 \cdot 2}{50} = 0.25 .$$

тогда:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{531,62}{0,25} = 2120 \text{ A.}$$

$$J_{\text{кл}} = J_2 = 1,77 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2$$

Площадь поперечного сечения кольца [1]:

$$h_{\text{кл}} = \frac{I_{\text{кл}}}{J_{\text{кл}}} = \frac{2120}{1,77 \cdot 10^6} = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Размеры замыкающих колец [1]:

$$h_{\text{кл}} = 1,3 \cdot h_{\text{п2}} = 1,3 \cdot 0,0315 = 0,041 \text{ м};$$

$$b_{\text{кл}} = \frac{q_{\text{кл}}}{\text{кл}} = \frac{1,19 \cdot 10^{-3}}{0,041} = 29,2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Принимаем

$$h_{\text{кд}} = 0,04 \text{ м.}$$

$$b_{\text{кл}} = 0,025 \text{ м.}$$

$$D_{\text{кл.ср}} = D_2 - h_{\text{кл}} = 437 - 40 = 397 \text{ мм.}$$

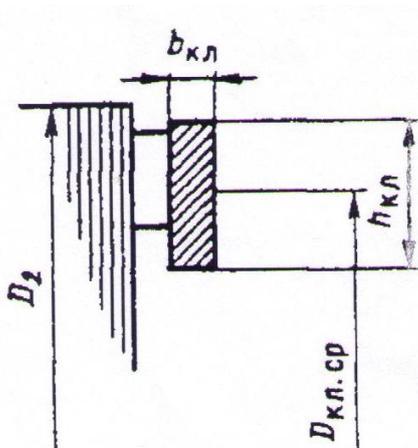


Рисунок 3 – Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора

Расчет ротора позволил нам спроектировать двигатель с улучшенными виброакустическими характеристиками, и погасить влияние высших гармоник (5-7 гармоники), что положительно сказывается на качестве и делает его более конкурентоспособным.

### 1.5 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводят для режима холостого хода двигателей, при котором характерно относительно сильное насыщения стали зубцов статора и ротора, что приводит к уплощению кривой поля в воздушном зазоре.

Магнитопровод выбирается из стали марки 2211 при высоте оси вращения 355 мм; толщина листов 0,5 мм.

### 1.5.1 Магнитное напряжение воздушного зазора [1]:

$$F_q = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta$$

где  $k_\delta$ - коэффициент воздушного зазора [1]:

$$k_\delta = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta}$$

$\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-6}$  Гн/ м.

$$\text{где } \gamma_1 = \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5+(b_{ш1}/\delta)} = \frac{(13 \cdot 10^{-3}/1,2 \cdot 10^{-3})^2}{5+(13 \cdot 10^{-3}/1,2 \cdot 10^{-3})} = 7,49$$

тогда:

$$k_\delta = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0,023}{0,023 - 7,49 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}} = 1,64.$$

тогда:

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_\delta = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,86 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,64 = 2693 \text{ А.}$$

Ширина зубца на 1/3 высоты паза статора

$$b_{z1/3} = \frac{\pi \left( D + \frac{2}{3} \cdot h_{n1} \right)}{Z1} - b_{n1} = \frac{\pi \left( 0,44 + \frac{2}{3} \cdot 0,0414 \right)}{60} - 0,013 = 0,0144 \text{ м.}$$

Коэффициент ответвления магнитного потока в паз статора

$$k_{px1} = \frac{b_{n1}}{b_{z1/3} \cdot k_{cl}} = \frac{0,013}{0,0114 \cdot 0,95} = 1,21$$

1.5.2 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны статора прежде найдем индукцию в них [1]:

$$B_{z1/3} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{b_{z1/3} \cdot k_{cl}} = \frac{0,84 \cdot 0,0112}{11,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,83 \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора [1]:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1}$$

$h_{z1}$  – высота зубца  $h_{z1} = h_n = 0,0414$  м.

$H_{z1}$  – напряжение зубцовой зоны статора [1];

$H_{z1} = 3050$  А/м для  $B_{z1} = 1,83$  Тл.

тогда:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,0414 \cdot 3050 = 252,32 \text{ А.}$$

1.5.3 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны ротора прежде найдем индукцию в них [1]:

Расчетная индукция максимальная

$$B_{z2max} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{z2}}{b_{z2min} \cdot l_{cm} \cdot k_{c2}} = \frac{0,86 \cdot 0,4 \cdot 0,027}{11,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 0,97} = 2,1 \text{ Тл.}$$

Расчетная индукция минимальная

$$B_{z2min} = \frac{B_{\delta} \cdot l_{\delta} \cdot t_{z2}}{b_{z2min} \cdot l_{cm} \cdot k_{c2}} = \frac{0,86 \cdot 0,4 \cdot 0,027}{15,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 0,97} = 1,58 \text{ Тл.}$$

Ширина зубца ротора на высоте 1/3 от основания паза

$$b_{z2cp} = \frac{\pi \left( D_2 + \frac{4}{3} \cdot h_{n2} \right)}{Z_2} - b_{n2} = \frac{\pi \left( 0,437 + \frac{2}{3} \cdot 0,0414 \right)}{60} - 0,013 = 0,0114 \text{ м.}$$

Индукция в зубцах ротора на высоте 1/3 от основания паза ротора

$$B_{Z2cp} = 0,25 \cdot (B_{Z2max} + 2 \cdot B_{Z2cp} + B_{Z2min}) = 0,25 \cdot (2,1 + 2 \cdot 1,88 + 1,58) = 1,87 \text{ Тл.}$$

Коэффициент ответвления магнитного потока в паз ротора

$$B_{Z2} = 0,25 \cdot (B_{Z2max} + 2 \cdot B_{Z2cp} + B_{Z2min}) = 0,25 \cdot (2,1 + 2 \cdot 1,88 + 1,58) = 1,87 \text{ Тл.}$$

Коэффициент ответвления магнитного потока в паз ротора

$$k_{px2} = \frac{b_{n2}}{b_{zcp2} \cdot k_{c2}} = \frac{0,012}{0,0114 \cdot 0,97} = 0,96.$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора [1]:

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2}$$

$$h_{Z2} = h_{n2} = 0,031 \text{ м высота зубца;}$$

$H_{Z2}$  – напряжение зубцовой зоны ротора [1]:

$$H_{Z2} = 3590 \text{ А/м для } B_{Z2} = 1,87 \text{ Тл.}$$

тогда:

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2} = 2 \cdot 0,031 \cdot 3590 = 222,6 \text{ А.}$$

1.5.4 Коэффициент насыщения зубцовой зоны [1]:

$$k_z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F\delta} = 1 + \frac{252,32 + 222,6}{2693} = 1,2.$$

Если  $k_z > 1,5 - 1,6$  имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если  $k_z > 1,2$ , то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В данном расчете коэффициент зубцовой зоны входит в диапазон рекомендуемых значений.

### 1.5.5 Магнитное напряжение ярма статора

$$d_{K2} = 0,015 \quad m_{K2} = 12.$$

Расчетная высота ярма ротора

$$h_{j2} = \pi \cdot \left( \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} \right) - \left( \frac{2}{3} \cdot d_{K2} \right) = \left( \frac{0,437 - 0,15}{2} - 0,031 \right) - \left( \frac{2}{3} \cdot 0,015 \right) \\ = 0,107 \text{ м.}$$

Предварительно найдем длину средней магнитной силовой линии в ярме [1]:

$$L_a = \pi \cdot \frac{(D_a - h_a)}{2p} = 3,14 \cdot \frac{(0,66 - 0,0686)}{4} = 0,464 \text{ м.}$$

где высота ярма статора

$$h_a = \frac{D_a - D}{2} - h_{n1} = \frac{0,66 - 0,44}{2} - 0,0414 = 0,0686 \text{ м.}$$

Индукция в ярме статора [1]:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{7,5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 68,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 0,95} = 1,45 \text{ Тл.}$$

Напряженность поля ярма статора при индукции [1]:

$$B_a = 1,45 \text{ Тл} \quad H_a = 763 \text{ А/м}$$

### 1.5.6 Магнитное напряжение ярма ротора

Расчитаем длину ярма ротора [1]:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{П2} = \frac{0,437 - 0,15}{2} - 0,031 = 0,113 \text{ м.}$$

Предварительно определим длину средней магнитной силовой линии в ярме ротора [1 с. 395]:

$$L_j = \pi \cdot \frac{(D_j + h_j)}{2p} = 3,14 \cdot \frac{(15 + 113) \cdot 10^{-3}}{4} = 0,206 \text{ м.}$$

Индукция в ярме ротора [1]:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{7,5 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 0,107 \cdot 0,4 \cdot 0,97} = 0,91 \text{ Тл.}$$

Напряженность поля ярма ротора при индукции  $B_j = 0,91$  Тл [1].

$H_j = 235$  А/м, тогда магнитное напряжение:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0,206 \cdot 235 = 48,5 \text{ А.}$$

1.5.7 Магнитное напряжение на пару полюсов [1]:

$$F_\mu = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 2693 + 252,32 + 222,6 + 354,4 + 48,5 \\ = 3571 \text{ А.}$$

1.5.8 Намагничивающий ток [1]:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_\mu}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{o61}} = \frac{2 \cdot 3571}{0,9 \cdot 2 \cdot 220 \cdot 0,9} = 13,2 \text{ А.}$$

Выразим намагничивающий ток в долях номинального тока двигателя [1]:

$$I_{\mu*} = \frac{I_\mu}{I_{1НОМ}} = \frac{13,2}{25,15} = 0,53.$$

Относительное значение  $I_{\mu*}$  служит определенным критерием правильности произведенного выбора и расчета размеров и обмотки двигателя.

## 1.6 Параметры рабочего режима

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора  $r_1$  и  $x_1$  ротора или приведенные к числу витков обмотки статора, сопротивления ротора  $r_2$  и  $x_2$ , и сопротивление взаимной индуктивности  $x_{12}$ , и расчетное сопротивление  $r_{12}$ , введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

1.6.1 Определим среднюю ширину катушки [1]:

$$b_{\text{км}} = \pi \cdot \frac{(D + h_{\text{П1}})}{2 \cdot p} \cdot \beta_1 = 3,14 \cdot \frac{(0,44 + 0,0414)}{4} \cdot 0,8 = 0,302 \text{ м.}$$

где  $\beta_1$  – коэффициент укорочения шага обмотки, принимаем  $\beta_1=0,8$ .

Для катушек из прямоугольного провода рассчитываем:

Допустимое расстояние между медью проводников соседних катушек  $S=0,006$  м.

$$m_1 = \frac{(b_{\text{м1}} + S)}{t_{z1}} = \frac{(0,0063 + 0,006)}{0,023} = 0,533.$$

Коэффициент для неизолированных лентой лобовых частей

$$K_{\text{л}} = \frac{1}{\sqrt{1 - m_1^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - 0,533^2}} = 1,18.$$

Коэффициент зависит от числа полюсов [1]:

$$K_{\text{выл}} = \frac{1}{2} \cdot K_{\text{л}} \cdot m_1 = \frac{1}{2} \cdot 1,18 \cdot 0,533 = 0,315.$$

Длина вылета лобовой части катушки [1]:

$$l_{\text{выл}} = k_{\text{выл}} \cdot b_{\text{кт}} + B + 0,5 \cdot h_{\text{н1}}$$

где:

$B$  – длина вылета прямолинейной части катушек из паза [1]:

$B = 0,035$  – для катушек из прямоугольного провода

тогда:

$$l_{\text{выл}} = 0,315 \cdot 0,302 + 0,035 + 0,5 \cdot 0,414 = 0,151 \text{ м.}$$

Длина позовой части равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_{\text{П1}} = l_{\delta} = 0,4 \text{ м.}$$

Длина лобовой части всыпной обмотки [1]:

$$l_{\text{л1}} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{км}} + 2 \cdot B + h_{\text{н1}} = 1,18 \cdot 0,302 + 2 \cdot 0,035 + 0,414 = 0,469 \text{ м,}$$

где  $K_{\text{л}}$  – коэффициент зависит от числа полюсов [1] для не изолированных лентой лобовых частей  $K_{\text{л}}=1,18$ .

Средняя длина витка [1 с. 398]:

$$L_{1\text{ср}} = l_{\text{ср1}} \cdot w_1 = 1,74 \cdot 220 = 382,8 \text{ м.}$$

Активное сопротивление обмотки статора [1]:

$$r_1 = k_R \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_{1\text{ср}}}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 1 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 382,8}{41 \cdot 5,49 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 1,71 \text{ Ом,}$$

где  $\rho_{115}=10^{-6}/41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  – удельное сопротивление меди при температуре плюс 115 °С; коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока  $k_R = 1$  [1].

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 1,71 \cdot \frac{25,15}{3465} = 0,0125.$$

1.6.2 Сопротивление стержня обмотки ротора [1]:

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{I_2}{q_c} = 26,64 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{0,4}{3 \cdot 10^{-4}} = 32,86 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

где  $\rho_{20} = 10^{-6}/56 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ;

$k_{to}=1,38$ .

$$\rho_{115} = \rho_{20} \cdot k_{to} = \frac{10^{-6}}{56} \cdot 1,38 = 24,64 \cdot 10^{-9} \text{ Ом} / \text{м}.$$

Сопротивление участка замыкающего кольца заключенного между двумя соседними стержнями [1]:

$$r_{\text{кл}} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}}} = 24,64 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{3,14 \cdot 0,397}{50 \cdot 3 \cdot 10^{-6}} = 1,23 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

1.6.3 Активное сопротивление фазы обмотки ротора [1]:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 32,86 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 1,23 \cdot 10^{-6}}{0,25^2} = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}.$$

Коэффициент приведения тока кольца к току стержня

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{p}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\pi \cdot \frac{2}{50}\right) = 0,25.$$

Для дальнейших расчетов полученное сопротивление фазы обмотки ротора к числу витков обмотки статора [1]:

$$\dot{r}_{2*} = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot K_{061})^2}{Z_2 \cdot k_{ck}} = 7,2 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (220 \cdot 0,9)^2}{50^2 \cdot 1} = 0,693 \text{ Ом},$$

где  $k_{ck} = 1$ .

Относительное значение [1]:

$$\dot{r}_{2*} = r_2 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} = 0,693 \cdot \frac{25,15}{3465} = 0,005.$$

1.6.4 Коэффициенты магнитной проводимости

$k_{\beta}$ - коэффициент зависящий от укорочения шага обмотки, т.к. укорочение отсутствует то выбираем  $k_{\beta}=1$  [1]:

$h_1 = 0$  (т.к. проводники закреплены пазовой крышкой);

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния [1]:

$$\begin{aligned}\lambda_{П1} &= \frac{(h_3 - \Delta_{пр})k_\beta}{3 \cdot b_{n1}} + \left( \frac{h_{кл}}{b_{n1}} \cdot k_\beta + \frac{\Delta_{пр}}{4 \cdot b_{n1}} \right) \\ &= \frac{(0,035 - 0,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 0,887}{3 \cdot 0,131} + \left( \frac{0,04}{0,131} \right) \cdot 0,85 + \frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 0,131} = 3,38,\end{aligned}$$

где  $h_3 = h_{n1} - 2b_{из} = 0,414 - 2 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3} = 0,035$  м,

$$k'_\beta = 0,25 + 0,75 \cdot \beta_1 = 0,25 + 0,75 \cdot 0,8 = 0,85,$$

$$k_\beta = 0,25 + 0,75 \cdot k'_\beta = 0,25 + 0,75 \cdot 0,85 = 0,887.$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1]:

$$\begin{aligned}\lambda_{Л1} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_\delta} \cdot (l_\tau - 0,64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{5}{0,4} \cdot (0,47 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,345) \\ &= 1,24.\end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1]:

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi$$

где  $\xi$  – коэффициент [1]:

$$\begin{aligned}\xi &= \left( 2 \cdot \frac{t_{z2}}{t_{z1}} - \frac{t_{z1}}{t_{z2}} \cdot \Delta z \right) \cdot k_\beta - K^2_{об1} \cdot \left( \frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 \\ &= \left( 2 \cdot \frac{0,0275}{0,023} - \frac{0,023}{0,0275} \cdot 0,1 \right) \cdot 0,887 - 0,9^2 \cdot \left( \frac{0,0275}{0,023} \right)^2 = 0,865.\end{aligned}$$

тогда:

$$\lambda_{Д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0,023}{12 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,64} \cdot 0,865 = 0,85.$$

1.6.5 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора [1]:

$$\begin{aligned} X_1 &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{\Pi 1} + \lambda_{\Lambda 1} + \lambda_{Д1}) \\ &= 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{220}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,4}{2 \cdot 5} \cdot (3,38 + 1,24 + 0,85) = 8,375 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки статора [1]:

$$x_{1*} = X_1 \cdot \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1zjv}} = 8,375 \cdot \frac{25,15}{3465} = 0,061.$$

1.6.6 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора [1]:

$$\lambda_{\Pi 2x} = \left(\frac{h_c}{3b_{n2}} + \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}}\right) \cdot k_D = \left(\frac{0,03}{3 \cdot 0,012}\right) \cdot 1 = 0,833.$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\Pi 2} &= \lambda_{\Pi 2x} + \left(0,3 + \frac{1,12 \cdot h_{\text{пр}} \cdot 10^6}{I_2}\right) \cdot k_D = 0,833 + \left(0,3 + \frac{1,12 \cdot 1 \cdot 10^6}{531,62}\right) \cdot 1 \\ &= 3,24. \end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1]:

$$\begin{aligned} \lambda_{\Lambda 2} &= \frac{2,3 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \left[ \frac{4,7 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{2 \cdot h_{\text{кл}} + 2 \cdot b_{\text{кл}}} \right] = \frac{2,3 \cdot 0,397}{50 \cdot 0,4 \cdot 0,25^2} \cdot \lg \left[ \frac{4,7 \cdot 0,397}{2 \cdot 0,04 + 2 \cdot 0,025} \right] \\ &= 0,842. \end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеивания [1]:  $\lambda_{Д2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi$ ,

$$\text{где } \xi = \left[ \left[ 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 3}{Z_2}\right)^2 \right] - \frac{\Delta z}{1 - \left[\frac{p}{Z_2}\right]^2} \right] = \left[ \left[ 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{50}\right)^2 \right] - \frac{0,1}{1 - \left[\frac{2}{50}\right]^2} \right] = 0,9.$$

$$\lambda_{Д2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0,0275}{12 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,64} \cdot 1 = 1,05.$$

1.6.7 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора [1]:

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{Д2}) \cdot 10^{-6} \\ = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,4 \cdot (3,24 + 0,842 + 1,05) \cdot 10^{-6} = 811 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

Проводим  $X_2$  к числу витков статора [1]:

$$x'_{2=X_2} \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2} = 811 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (220 \cdot 0,9)^2}{50} = 7,8 \text{ Ом.}$$

Относительное значение [1]:

$$x'_{2*} = x'_{2} \cdot \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 7,08 \cdot \frac{25,15}{3465} = 0,057$$

Для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчета характеристик асинхронных машин выражают в относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток.

## 1.7 Расчет потерь

Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные) электрические вентиляционные механические и добавочные при нагрузке.

Основные потери в стали рассчитываются только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны. Добавочные потери в стали подразделяют на поверхностные (потери в поверхностном слое коронок зубцов статора и ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах). Добавочные потери при нагрузке возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций и индукции в воздушном зазоре ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора и ряд а других причин. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают

потери от поперечных токов, т.е. токов между стержнями замыкающихся через листы сердечника ротора.

### 1.7.1 Основные потери в стали статора асинхронной машины [1]:

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{1,0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{Z_{\text{ср}}}^2 \cdot m_{Z1}),$$

где  $p_{1,0/50}$  – удельные потери при индукции 1Тл и частоте перемагничивания 50 Гц. [1]: сталь 2212 толщиной 0,5 мм,

$$p_{1,0/50} = 2,2 \text{ Вт/кг},$$

$\beta$  – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания для большинства сталей  $\beta = 1,5$ ,

$k_{\text{да}}$  и  $k_{\partial z}$  – коэффициенты учитывающие влияния на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов.

$$k_{\text{да}} = 1,6 \quad k_{\partial z} = 1,8.$$

$m_a, m_{Z1}$  – масса стали яра и зубцов статора [1]:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c ,$$

$$m_{Z1} = h_{Z1} \cdot b_{Z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c ,$$

Где  $\gamma_c$  – удельная масса стали; в расчетах принимают  $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup> [1]

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = 3,14 \cdot (0,66 - 0,0686) \cdot 0,0686 \cdot 0,4 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 378 \text{ кг}.$$

$$\begin{aligned} m_{Z1} &= h_{Z1} \cdot b_{Z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c \\ &= 0,0414 \cdot 9,92 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \cdot 0,4 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг}. \end{aligned}$$

тогда:

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{\frac{1,0}{50}} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (k_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{Z\text{сп}}^2 \cdot m_{z1})$$

$$= 2,2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,45^2 \cdot 378 + 1,8 \cdot 2,1^2 \cdot 73) = 4072 \text{ Вт.}$$

Для нахождения поверхностных потерь прежде находят амплитуду пульсаций индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta [1],$$

где:  $\frac{b_{\text{ш}}}{\delta} = 10,9$  – по данному значению коэффициент  $\beta_{02} = 0,4$  [1],

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0,4 \cdot 1,64 \cdot 0,86 = 0,577 \text{ Тл на } 1 \text{ м}^2 \text{ поверхности.}$$

Поверхностные потерь в роторе [1],

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} \cdot (t_{z2} - b_{\text{ш2}}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta,$$

где  $P_{\text{пов2}}$  – удельные поверхностные потери, т.е. потери в поверхностном слое коронок зубцов ротора [1]:

$$P_{\text{пов2}} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2,$$

где  $k_{02}$  – коэффициент учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери [1]  $k_{02}=1,7$ ;

$$P_{\text{пов2}} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 = 0,5 \cdot 1,7 \cdot \left(\frac{60 \cdot 1500}{10000}\right)^{1,5} \cdot (0,577 \cdot 0,023 \cdot 10^3)^2 = 4050,7 \text{ Вт/м}^2.$$

тогда:

$$P_{\text{пов2}} = P_{\text{пов2}} \cdot (t_{z2} - b_{\text{ш2}}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta = 4050,7 \cdot (0,0275 - 0) \cdot 50 \cdot 0,4 = 2227,5 \text{ Вт.}$$

1.7.2 Для определения пульсационных потерь необходимо определить массу ротора [1]:

$$m_{Z2} = Z_2 \cdot h_{Z2} \cdot b_{Z2cp} \cdot l_{\delta} \cdot k_{c2} \cdot \gamma_c = 50 \cdot 0,0315 \cdot 12,9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4 \cdot 0,97 \cdot 7800 \\ = 61,3 \text{ кг.}$$

А также амплитуду пульсаций индукции в среднем сечении зубцов [1]:

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{Z2}} \cdot B_{Z2} = \frac{7,5 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,0275} \cdot 1,87 = 0,306 \text{ Тл.}$$

Тогда пульсационные потери в зубцах ротора [1]:

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пул2}} \right)^2 \cdot m_{Z2} = 0,11 \cdot \left( \frac{60 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,306 \right)^2 \cdot 61,3 \\ = 5120 \text{ Вт.}$$

1.7.3 Сумма добавочных потерь в стали [1]:

$$P_{\text{ст,доб}} = P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} = 2227,5 + 5120 = 7347,5 \text{ Вт.}$$

1.7.4 Полные потери стали [1]:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст,осн}} + P_{\text{ст,доб}} = 4072 + 7347,5 = 11419 \text{ Вт.}$$

1.7.5 Механические потери [1]:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left( \frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 0,442 \cdot \left( \frac{1500}{10} \right)^2 \cdot 0,66^4 = 1887 \text{ Вт.}$$

где  $K_T$  – коэффициент для двигателей с  $2p=4$  равен

$$K_T = 1,3(1 - D_a) - 0,442 [1].$$

1.7.6 Для определения тока холостого хода двигателя принимают что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе такие же как и при номинальном режиме. При этом условии активная составляющая тока холостого хода [1]:

$$I_{x.x.a} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1x.x}}{m \cdot U_{ном}}$$

где  $P_{э1x.x}$  – электрические потери в статоре при холостом ходе [1]:

$$P_{э1x.x} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 13,23^2 \cdot 7,71 = 901,7 \text{ Вт.}$$

$$\text{тогда: } I_{x.x.a} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{э1x.x}}{m \cdot U_{ном}} = \frac{11419 + 1887 + 901,7}{3 \cdot 3465} = 1,37 \text{ А.}$$

тогда ток холостого хода двигателя [1]:

$$I_{x.x} \approx \sqrt{I_{x.x.a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{1,37^2 + 13,23^2} = 13,3 \text{ А.}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе [1]:

$$\cos \varphi_{x.x} = \frac{I_{x.x.a}}{I_{x.x}} = \frac{1,37}{13,3} = 0,103.$$

Принимаем, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при х.х. двигателя такие же, как и при номинальном режиме.

Потери холостого хода (постоянные потери):

$$P_{x.x} = P_{ст} + P_{мех} = 11419 + 1887 = 13307 \text{ Вт.}$$

## 1.8 Расчёт рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости  $P_1, I_1, \cos \varphi, \eta, s_1 = f(P_2)$ . Рабочие характеристики можно рассчитать по круговой диаграмме или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне  $s = (0,2 \dots 0,5) \cdot s_{ном}$ . Номинальное

скольжение можно предварительно взять при  $s_{\text{ном}} = \dot{r}_{2*}$ . Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти-шести различных скольжений выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы.

1.8.1 Сопротивление схемы замещения [1]:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{470}{3 \cdot 13,23^2} = 7,75 \text{ Ом.}$$

1.8.2 Сопротивление взаимной индукции обмоток статора [1]:

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{3465}{13,23} - 8,375 = 253,6 \text{ Ом.}$$

Тогда полное значение коэффициента  $c_1$  будет определяться следующим образом [1]:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{8,375}{253,6} = 1,033.$$

1.8.3 Активная составляющая тока синхронного холостого хода замыкания [1]:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{470 + 3 \cdot 13,23^2 \cdot 1,7}{3 \cdot 3465} = 0,48 \text{ А.}$$

1.8.4 Коэффициенты для расчета пусковых характеристик [1]:

$$\dot{a} = c_1^2 = 1,067$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1,033 \cdot 1,7 = 1,49 \text{ Ом} \quad b = 4,7 \text{ Ом}$$

Потери, неизменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 11419 + 1887 = 13307 \text{ Вт}$$

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений указанных в таблице №4.

Таблица 4 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Расчетные формулы	Размерность	Скольжение s					
		030001	030013	0,0022	0,0036	0,0045	0,005
$a' \cdot r'_2 / s'$	Ом	7393	568	336	205	164	148
$R = a + a' \cdot r'_2 / s$	Ом	1619	570	338	207	166	150
$X = b + b' \cdot r'_2 / s$	Ом	17	17	17	17	17	17
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	1619,6	570,5	338,6	207,8	167	151
$I'_2 = U_{1НОМ} / Z$	А	2,14	6,07	2410	16,6	20,7	23
$\cos \varphi_2 = R / Z$	-	0,999	0,999	0,998	0,996	0,994	0,993
$\sin \varphi_2 = X / Z$	-	0,01	0,029	0,05	0,081	0,1	0,11
$I_{1a} = I_{0a} + I'_2 \cdot \cos \varphi_2$	А	0,48	6,55	10,7	17	21,1	23,3
$I_{1p} = I_{0p} + I'_2 \cdot \sin \varphi_2$	А	13,2	13,4	13,7	14,6	15,3	18,8
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	13,24	14,9	17,4	22,5	26,1	28,2
$I'_2 = c_1 \cdot I'_2$	А	2,21	6,27	10,6	17,2	21,4	23,7
$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	13,3	68	111,3	177,6	219,6	242,6
$P_{\varepsilon 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,9	1,14	1,56	2,6	3,5	4,1
$P_{\varepsilon 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,01	0,082	0,233	0,616	0,95	1,17
$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \cdot (I_1 / I_1)^2 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,067	0,34	0,55	0,888	1,1	1,21
$\sum P \equiv (P_{\text{СТ}} + P_{\text{МЕХ}} + P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_{\text{ДОБ}}) \cdot 10^{-3}$	кВт	13,3	14,87	15,66	17,4	18,87	19,8
$P_2 = (P_1 - \sum P) \cdot 10^{-3}$	кВт	0	53,1	95,6	160,2	200	222,8
$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0	0,781	0,859	0,902	0,914	0,918
$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	-	0,036	0,438	0,614	0,76	0,809	0,827

Выразим в относительных единицах:

Ток статора  $I_{1i} = \frac{I_{1i}}{I_{1НОМ}}$ , о. е.

Подводимая активная мощность  $n_{2i} - s_i$ , о. е.

Полезная мощность на валу двигателя  $P_{2i} = \frac{P_{2i}}{P_{2ном}}$ , о. е.

$I_1, P_1, n_2, \eta,$   
 $\cos\psi$ , о.е.

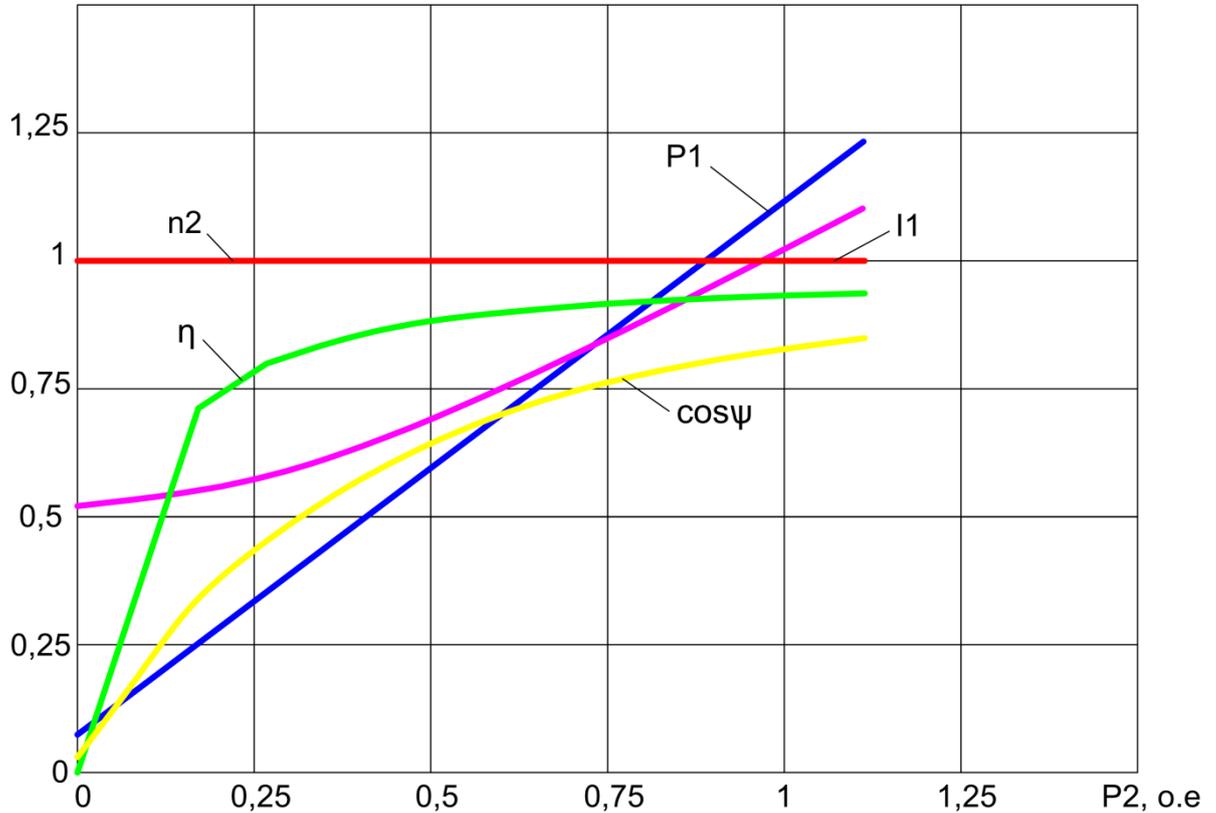


Рисунок 4 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

### 1.9 Энергосбережение асинхронных взрывозащищенных двигателей

В соответствии с «Энергетической стратегией на период до 2020 года» высшим приоритетом государственной энергетической политики является повышение энергоэффективности промышленности. Эффективность российской экономики существенно снижается из-за ее высокой энергоемкости. По этому показателю Россия опережает США в 2,6 раза, Западную Европу в 3,9 раза, Японию – в 4,5 раза [18]. Лишь отчасти указанные различия могут быть оправданы суровыми климатическими условиями России и обширностью ее территории. Одним из основных

способов предотвращения энергетического кризиса в нашей стране – проведение политики, предусматривающей масштабное внедрение на предприятиях энерго и ресурсосберегающих технологий. Энергосбережение превратилось в приоритетное направление технической политики во всех развитых странах мира.

Актуальность проблемы в настоящее время обусловлена не эффективным расходованием природных и материальных ресурсов, значительным удорожанием производства тепловой и электрической энергии. Россия располагает большим потенциалом энергосбережения. По оценкам специалистов он составляет 40-45 % современного энергопотребления в стране, причем треть этого потенциала экономии имеют отрасли топливно-энергетического комплекса, другая треть сосредоточена в энергоёмких отраслях промышленности и строительстве, свыше 25% - жилищно-коммунальном хозяйстве, 7% - на транспорте и 3% - в сельском хозяйстве. В настоящее время проводится реформа жилищно-коммунального хозяйства. В её основе лежит снижение потерь и повышения энергоэффективности всех систем жилищно-коммунального хозяйства [16].

Энергосбережение - это реализация комплекса организационных, правовых, производственных, научных, экономических, технических и других мер, направленных на рациональное использование и экономное расходование топливно-энергетических ресурсов. Кроме того, в систему экономии энергии включают меры по вовлечению в хозяйственный оборот возобновляемых источников энергии [16].

Рассмотренные соображения должны учитываться при проектировании машины. Правильный выбор материалов даст нам не только улучшить надежность машины, но вместе с тем, повысить остальные ее технико-экономические показатели: снизить потери, ток холостого хода, повысить КПД и коэффициент мощности.

Основными критериями совершенствования АД являются:

- повышение энергоэффективности;
- снижение уровня шума;
- универсализация;
- повышение надежности и долговечности;
- совершенствование дизайна;
- повышение удобства монтажа и эксплуатации.

В Европейском союзе (ЕС) существует проект “Энергосбережение в электроприводе”. Его комиссия производителей электрических машин и силовой электроники в 1999 г. заключила добровольное соглашение с фирмами-изготовителями о переходе с 2000 г. на классификацию электродвигателей по трем уровням КПД (рис.1): EFF3 - нормальный, EFF2 – повышенный, EFF1 – высокий. Фирмы брали на себя добровольное обязательство к 2004 г. сократить на 50% производство машин класса EFF3. Российский стандарт ГОСТ Р 51677-2000 предусматривает для АД от 1,1 до 400 кВт всех чисел полюсов два уровня КПД: нормальный и повышенный. Известно, что КПД производства, передачи и распределения электроэнергии в среднем равен 33%. Это означает, что каждый киловатт-час, сэкономленный электро- двигателем, экономит 3 кВт часа первичной энергии.

Таблица 16

$l_{\delta}$	0,4	0,4	0,4	0,4
$w_1$	220	209	198	187
Коэффициент мощности	0,827	0,836	0,844	0,8528
КПД	0,918	0,9219	0,925	0,93

Для удовлетворения требований по энергосбережению требуется коренным образом изменить подход к проектированию по двум причинам:

- удорожание электрической энергии;
- дефицит электрической энергии.

В повышении эффективности общественного производства в условиях проведения экономических реформ и развития рыночных отношений одно

из важнейших направлений ресурсо- и энергосбережению во всех отраслях экономики России, в том числе в строительном комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве. Экономия энергетических ресурсов в настоящее и в обозримом будущем является приоритетным направлением в различных областях человеческой деятельности, особенно в сфере создания среды жизнеобеспечения человека, поскольку её нормальное функционирование требует существенных энергетических затрат, связанных с эксплуатацией жилых и общественных зданий, производственных объектов и их инфраструктуры.

Также одним из самых перспективных экономически оправданных направлений из всех энергосберегающих технологий является разработка и внедрение регулируемого привода на основе АД. Ёмкость рынка преобразователей частоты для России составляет, по оценкам экспертов десятки млн. штук, в том числе и для высоковольтных взрывозащищенных двигателей, предназначенных для привода вентиляторов. При внедрении регулируемого асинхронного электропривода срок окупаемости составляет меньше одного года. Также при использовании асинхронного регулируемого электропривода не стоит забывать об основной его части - асинхронном двигателе. АД является одним из основных источников потерь в электроприводе. При этом, экономить энергию можно не только за счет регулировки частоты и напряжения питающей сети при изменении нагрузок, но и за счет снижения потерь в самом АД и для этого спроектированный двигатель был модифицирован.

В данном разделе с целью повышения энергетических показателей двигателя увеличиваем длину магнитопровода на (5...20)%, а также уменьшаем число витков в фазе обмотки статора на (5...15)%, при сохранении геометрии поперечного сечения.

Данные представлены в таблице 15.

В результате исследования можно сделать вывод, что самые лучшие энергетические показатели для проектируемого двигателя оказались при

базовой длине и уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 15%. Из таблицы 15 видно, что при снижении числа витков в обмотке статора приведет к тому, что энергетические показатели будут расти, также будут расти и потери, но незначительно.

Данные представлены в таблице 16.

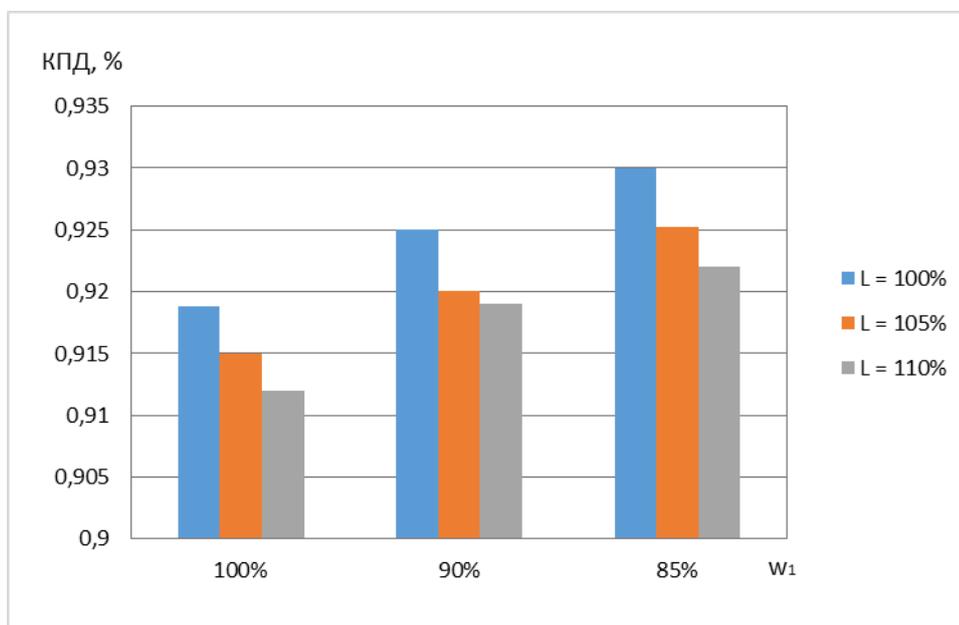


Рисунок 15 - Зависимость КПД от числа витков в обмотке фазы статора

Из рисунка 15 видно, что при уменьшении числа витков, КПД будет увеличиваться. При уменьшении числа витков в обмотке фазы статора на 10% КПД возросло до 0,93. Дальнейшее уменьшение длины статора нецелесообразно, т.к. КПД становится меньше.

Таким образом, был спроектирован энергосберегающий высоковольтный АД предназначенный для вентилятора главного проветривания, у которого КПД увеличенно на 1,21% выше по сравнению с базовым двигателем, за счет понижения числа витков в обмотке фазы статора и двигатель стал удовлетворять нормам EFF1.

Таблица 15 - Результаты расчета

$l_{\delta}$	100%	100%	100%	105%	105%	105%	110%	110%	110%
$w_1$	220	198	189	220	198	189	220	198	189
Полные потери в стали [Вт]	11328	11487	11462	11709	12029	12120	12028	12493	12695
Механические потери [Вт]	1887	1887	1887	1887	1887	1887	1887	1887	1887
Эл. Потери в статоре при х.х. [Вт]	901,7	1145	1302	909,2	1157	1316	916,1	1167	1330
Ток х.х [А]	13,29	14,97	15,95	13,2	14,88	15,87	13,11	14,79	15,78
Коэффициент мощности х.х. [Вт]	0,1	0,0933	0,088	0,1	0,09	0,0929	0,1	0,1	0,097
Потери х.х (постоянные)[Вт]	13215	13374	13349	13596	13916	14007	13915	14380	14582
Коэффициент мощности (%)	0,82	0,84	0,852	0,823	0,84	0,849	0,82	0,837	0,845
КПД (%)	0,9188	0,925	0,93	0,915	0,92	0,9252	0,912	0,919	0,922

### 1.9.1 Расчет пусковых характеристик

Пусковыми характеристиками асинхронного двигателя являются в зависимости  $I' = f(s)$  и  $M' = f(s)$ . Отношение начального пускового момента к номинальному  $M'$  с короткозамкнутым ротором должно быть не ниже, а отношение начального пускового тока к номинальному – не выше значений оговоренных в ГОСТе. При указанных в ГОСТ отношениях  $I'$  возникает насыщение путей потоков пазового рассеяния вызывающее существенное уменьшение индуктивных сопротивлений обмоток статора и ротора. Кроме того в обмотке ротора необходимо учитывать эффект вытеснения тока. Оба этих фактора влекут за собой увеличение пускового тока и пускового момента.

Определим ряд величин для нахождения активного сопротивления обмотки ротора.

Проведем расчет для момента пуска  $s=1$ .

1.9.1 Параметры с учетом вытеснения тока [1]: для медной обмотке при температуре плюс 115 °С:

$$\xi = 2\pi \cdot h_c \cdot \sqrt{f \cdot \frac{s \cdot 10^{-7}}{\rho_{75}}} = 2\pi \cdot 0,0315 \cdot \sqrt{50 \cdot \frac{10^{-7}}{4,057}} = 2,82,$$

где  $h_c$  – высота стержня в пазу,

$$h_c = h_{п2} - (h_{ш2}) = 0,00315 - 0 = 0,00315 \text{ м.}$$

В случае прямоугольных стержней короткозамкнутой обмотки ротора коэффициент демпфирования  $k_d$  и коэффициент увеличения активного сопротивления стержня  $k_r$  рассчитываются по формулам:

$$k_r = \xi \cdot \frac{sh(2 \cdot \xi) + \sin(2 \cdot \xi)}{ch(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)} = 2,82 \frac{sh(2 \cdot 2,82) + \sin(2 \cdot 2,82)}{ch(2 \cdot 2,82) - \cos(2 \cdot 2,82)} = 2,81.$$

$$k_D = \frac{3}{2 \cdot \xi} \cdot \frac{sh(2 \cdot \xi) - \sin(2 \cdot \xi)}{ch(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)} = \frac{3}{2 \cdot 2,82} \cdot \frac{sh(2 \cdot 2,82) - \sin(2 \cdot 2,82)}{ch(2 \cdot 2,82) - \cos(2 \cdot 2,82)} = 0,54.$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока [1]:

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1 + \frac{3,28 \cdot 10^{-5}}{7,2 \cdot 10^{-5}} \cdot (2,82 - 1) = 1,83.$$

Приведенное активное сопротивление фазы обмотки с учетом вытеснения тока

$$r'_{2\xi} = r'_2 \cdot K_R = 0,693 \cdot 1,27 \text{ Ом.}$$

### 1.9.2 Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

Для определения коэффициента характеризующего изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока найдем коэффициент магнитной проводимости пазового

$$\begin{aligned} \lambda_{\Pi 2\xi} &= \lambda_{\Pi 2x} + \left( 0,3 + \frac{1,12 \cdot h_{\text{пр}} \cdot 10^6}{I_{2c} \cdot k_{\text{pi}2}} \right) \cdot k_D \\ &= 0,833 + \left( 0,3 + \frac{1,12 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{515,03 \cdot 12} \right) \cdot 0,54 = 1, \end{aligned}$$

где  $K_D = \varphi' = 0,54$ ,

Тогда коэффициент характеризующий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока [1]:

$$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\text{д}2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\text{л}2} + \lambda_{\text{д}2}} = \frac{1 + 0,842 + 1,05}{3,24 + 0,842 + 1,05} = 0,582.$$

Приведенное индуктивное сопротивление с учетом эффекта вытеснения тока находится по [1]:

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x = 7.8 \cdot 0.582 = 4.53 \text{ Ом.}$$

Пусковые параметры определяются по [1]

$$x_{12\Pi} = k_\mu \cdot x_{12} = 1,327 \cdot 253,57 = 336,5 \text{ Ом.}$$

При этих допущениях коэффициент  $c_{1\Pi}$  [1]:

$$c_{1\Pi} = 1 + \frac{x_1}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{8,37}{336,5} = 1,025.$$

Для расчета токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока прежде найдем активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1]:

$$R_\Pi = r_1 + c_{1\Pi} \frac{r'_{2\xi}}{s} = 1,72 + 1,025 \cdot 1,267 = 3,02 \text{ Ом.}$$

$$X_\Pi = x_1 + c_{1\Pi} x'_{2\xi} = 8,37 + 1,025 \cdot 4,53 = 13,03 \text{ Ом.}$$

Тогда ток в обмотке ротора [1]:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2}} = \frac{3465}{\sqrt{3,02^2 + 13,03^2}} = 259,2 \text{ А.}$$

Ток в обмотке статора [1]:

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_\Pi^2 + (X_\Pi + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}} = 259,2 \cdot \frac{\sqrt{3,02^2 + (13,03 + 336,5)^2}}{1,025 \cdot 336,5} = 262,7 \text{ А.}$$

Таблица 5 Расчет токов в пусковом режиме АД с КЗ ротором с учетом влияния эффекта вытеснения тока

Расчетные формулы	Размерность	Скольжение s					
		1	0,64	0,44	0,2	0,05	0,001
$\xi = 2\pi \cdot \sqrt{f \cdot \frac{s \cdot 10^{-7}}{\rho_{75}}}$	-	2,82	2,25	1,88	1,26	0,63	0,09
$k_r = \xi \cdot \frac{sh(2 \cdot \xi) + \sin(2 \cdot \xi)}{ch(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}$	-	2,81	2,17	1,72	1,18	1,04	1,02
$k_D = \frac{3}{2 \cdot \xi} \cdot \frac{sh(2 \cdot \xi) - \sin(2 \cdot \xi)}{ch(2 \cdot \xi) - \cos(2 \cdot \xi)}$	Мм	0,54	0,67	0,78	0,92	0,97	0,99
$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1)$	-	1,83	1,53	1,33	1,08	1,02	1
$r'_{2\xi} = \dot{r}'_2 \cdot K_R$	Ом	1,27	1,06	0,92	0,75	0,706	0,699
$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2x} + \left(0,3 + \frac{1,12 \cdot h_{pr} \cdot 10^6}{I_{2c} \cdot k_{pi2}}\right) \cdot k_D$	-	1	1,03	1,06	1,1	1,12	1,13
$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{D2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\Pi 2} + \lambda_{D2}}$	-	0,582	0,57	0,57	0,58	0,58	0,58
$x'_{2\xi} = x'_{2} \cdot K_x$	Ом	4,53	4,44	4,49	4,55	4,58	4,59
$R_{\Pi} = r_1 + c_{1\Pi} \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	3,02	3,42	3,84	5,57	16,2	718
$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} x'_{2\xi}$	Ом	13,03	12,93	12,98	13,04	13,07	13,08
$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}}$	А	259,2	259	256	244,2	166,4	4,82
$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}}$	А	262,7	262,4	259,3	247,6	168,8	11,17

Для непосредственного расчета пусковых характеристик с учетом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния необходимо задаться предполагаемой кратностью увеличения тока  $k_{нас}$  обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны. Ориентировочно для расчета пусковых режимов принимают

$$k_{нас} = 1,25 \div 1,4 [1]:$$

Произведем подробный расчет для  $s=1$ . Примем  $k_{\text{нас}} = 1,05$ .

1.9.3 Определим среднюю МДС обмотки отнесенную к одному пазу обмотки статора [1]:

$$F_{\text{П.ср}} = 0,7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{\text{нас}} \cdot U_{\text{П}}}{a} \cdot \left( k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right),$$

где  $k_{y1} = 1$  – коэффициент укорочения.

тогда:

$$\begin{aligned} F_{\text{П.ср}} &= 0,7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{\text{нас}} \cdot U_{\text{П}}}{a} \cdot \left( k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \\ &= 0,7 \cdot \frac{262,66 \cdot 1,05 \cdot 22}{1} \cdot \left( 0,85 + 0,9 \cdot \frac{60}{50} \right) = 4713 \text{ А.} \end{aligned}$$

Для расчета фиктивной индукции потока рассеяния в воздушном зазоре определим следующий коэффициент [1]:

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{0,023 + 0,0275}} = 1,02.$$

Тогда фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре [1]:

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{П.ср}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{4713 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,02} = 2,39 \text{ Тл.}$$

По полученному значению индукции определяем отношение потока рассеяния при насыщении потоку рассеяния ненасыщенной машины характеризуемое коэффициентом  $k_{\delta}$  значение, которого находят о кривой [1]:  $k_{\delta}=0,8$ .

$$c_{\delta 1} = (t_{z1} - b_{\text{ш1}}) \cdot (1 - k_{\delta}) = (0,023 - 1 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0,8) = 2,06 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшения коэффициента магнитной проводимости рассеяния для полузакрытого паза [1]:

$$h_k = \frac{b_{n1} - b_{ш1}}{2} = 0.$$

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{П1нас} &= \frac{h_{ш1} + 0,58 \cdot h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_{э1}}{c_{э1} + 1,5 \cdot b_{ш1}} \\ &= \frac{1 \cdot 10^{-3} + 0,58 \cdot 0 \cdot 10^{-3}}{13,1 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2,06 \cdot 10^{-3}}{2,06 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 13,1 \cdot 10^{-3}} \\ &= 7,25 \cdot 10^{-3}. \end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора [1]:

$$\lambda_{П1нас} = \lambda_{П1} - \Delta\lambda_{П1нас} = 3,38 - 3,25 \cdot 10^{-3} = 3,37.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения [1]:

$$\lambda_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{П1нас} + \lambda_{Д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{П1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{л1}} = 8,37 \cdot \frac{3,37 + 0,67 + 1,24}{3,38 + 0,85 + 1,24} = 8,09 \text{ Ом.}$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов ротора магнитное напряжение, которое будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов [1]:

$$c_{э2} = (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - k_\delta) = (0,027 - 0) \cdot (1 - 0,8) = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротор с учетом влияния насыщения [1]:

$$\Delta\lambda_{П2нас} = 0.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для ротора [1]:

$$\lambda_{\text{П2}\xi_{\text{нас}}} = \lambda_{\text{П2}\xi} = 1.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения [1]:

$$\lambda_{\text{Д2нас}} = \lambda_{\text{Д2}} \cdot k_{\delta} = 1,05 \cdot 0,8 = 0,83.$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1]:

$$\dot{x}_{2\xi zfc} = \dot{x}_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{П2}\xi_{\text{нас}}} + \lambda_{\text{Д2нас}} + \Delta\lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{Д2}} + \Delta\lambda_{\text{л2}} + \Delta\lambda_{\text{П2}}} = 7,8 \cdot \frac{1 + 0,83 + 0,84}{1,05 + 0,84 + 3,24} = 4,2 \text{ Ом.}$$

Уточним коэффициент  $c_{1\Pi}$  [1]:

$$c_{1\Pi_{\text{нас}}} = 1 + \frac{x_{1_{\text{нас}}}}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{8,09}{336,5} = 1,024.$$

1.9.4 Расчет тока и моментов с учетом влияния вытеснения тока и насыщения.

Найдем активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1]:

$$R_{\text{Пнас}} = r_1 + c_{1\Pi_{\text{нас}}} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{s} = 1,72 + 1,024 \cdot 1,26 = 3,016 \text{ Ом.}$$

$$X_{\text{Пнас}} = x_{1_{\text{нас}}} + c_{1\Pi_{\text{нас}}} \cdot x'_{2\xi_{\text{нас}}} = 8,09 + 1,024 \cdot 4,2 \text{ Ом.}$$

Ток в обмотке ротора с учетом влияния вытеснения тока и насыщения [1]:

$$I'_{2_{\text{нас}}} = \frac{U_{1_{\text{НОМ}}}}{\sqrt{R_{\text{Пнас}}^2 + X_{\text{Пнас}}^2}} = \frac{3465}{\sqrt{3,016^2 + 12,4^2}} = 271 \text{ А.}$$

Ток в обмотке статора с учетом влияния вытеснения тока и насыщения [1]:

$$I_1 = I'_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{Пнас}}^2 + (X_{\text{Пнас}} + x_{12\text{П}})^2}}{c_{1\text{Пнас}} \cdot x_{12\text{П}}} \\ = 217,5 \cdot \frac{\sqrt{3,016^2 + (12,4 + 336,5)^2}}{1,024 \cdot 336,5} = 274,9 \text{ А.}$$

Определим кратность тока и момента при заданном скольжении  $s=1$  [1]:

$$I_{1*} = \frac{I_1}{I_{1\text{НОМ}}} = \frac{274,9}{26,1} = 10,53 \text{ А.}$$

$$M_{\text{ЭМ}*} = \left(\frac{I'_{2\text{нас}}}{I'_{2\text{НОМ}}}\right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{\text{НОМ}}}{s} = \left(\frac{271,54}{21,44}\right)^2 \cdot 1,83 \cdot \frac{0,0045}{1} = 1,32.$$

Данные расчета сведены в таблицу 6, а пусковые характеристики представлены на рисунке 5.

Таблица 6 – Пусковые характеристики двигателя

Расчетные формулы	Размерность	Скольжение $s$					
		1	0,64	0,44	0,2	0,05	0,001
$k_{\text{нас}}$	-	1,05	1,02	1	1	1	1
$F_{\text{П.ср}} = 0,7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{\text{нас}} \cdot U_{\text{П}}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}\right)$	А	4764	4593	4466	4277	2902	191
$B_{\varphi\delta} = \frac{F_{\text{П.ср}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_n}$	Тл	2,42	2,33	2,27	2,17	1,47	0,1
$k_{\delta} = af(B_{\varphi\delta})$	-	0,8	0,81	0,82	0,83	0,91	0,99
$c_{\text{Э1}} = (t_{Z1} - b_{\text{ш1}}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	21,9	1,9	1,8	1,6	815	28,9
$\lambda_{\text{П1нас}} = \lambda_{\text{П1}} - \Delta\lambda_{\text{П1нас}}$	-	3,37	3,37	3,37	3,37	3,38	3,38
$\lambda_{\text{Д1нас}} = \lambda_{\text{Д1}} \cdot k_{\delta}$	-	0,68	0,69	0,7	0,71	0,78	0,85
$x_{1\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\sum \lambda_{1\text{нас}}}{\sum \lambda_1}$	Ом	8,1	8,12	8,13	8,15	8,26	8,37
$c_{1\text{Пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{П}}}$	-	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024
$c_{\text{Э2}} = (t_{Z2} - b_{\text{ш2}}) \cdot (1 - k_{\delta})$	мм	5,5	5,1	4,9	4,5	2,3	0,08
$\lambda_{\text{П2}\xi\text{нас}} = \lambda_{\text{П2}\xi} - \Delta\lambda_{\text{П2}\xi\text{нас}}$	-	1	1	1	1	1	1

$\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2} \cdot k_{\delta}$	-	0,84	0,85	0,86	0,88	0,96	1,05
$x'_{2\xiнас} = x'_{2} \cdot \frac{\sum \lambda_{2\xiнас}}{\sum \lambda_{2}}$	Ом	4,07	4,09	4,11	4,13	4,26	4,38
$R_{Пнас} = r_1 + c_{П.нас} \cdot r'_{2\xi}/s$	Ом	3,02	3,42	3,83	5,57	16,2	718
$X_{Пнас} = x_{1нас} + c_{1П.нас} \cdot x'_{2\xiнас}$	Ом	12,2 8	12,31	12,3 4	12,38	12,6 3	12,86
$I'_{2нас} = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{R_{Пнас}^2 + X_{Пнас}^2}}$	А	274, 1	271,2	268, 2	255,3	168, 7	4,7
$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{Пнас}^2 + (X_{Пнас} + x_{12П})^2}}{c_{1Пнас} \cdot x_{12П}}$	А	277, 4	274,5	271, 5	258,4	171	11,2
$k'_{нас} = I_{1нас}/I_1$	-	1,04 5	1,04	1,03 8	1,032	1	1
$I_{1*} = I_1/I_{1НОМ}$	-	10,6 3	10,51	10,4	9,9	6,55	0,43
$M_{эм*} = \left(\frac{i_{2П.нас}}{i_{2НОМ}}\right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_{НОМ}}{S}$	-	1,34	1,72	2,09	3,46	5,68	0,22

1.9.5 Критическое скольжение определяем после расчета всех точек пусковых характеристик.

$$s_{кр} = \frac{k'_2}{\frac{x_{1нас}}{c_{1Пнас}} + x'_{2\xiнас}} = \frac{0,693}{\frac{8,1}{1,024} + 4,07} = 0,058.$$

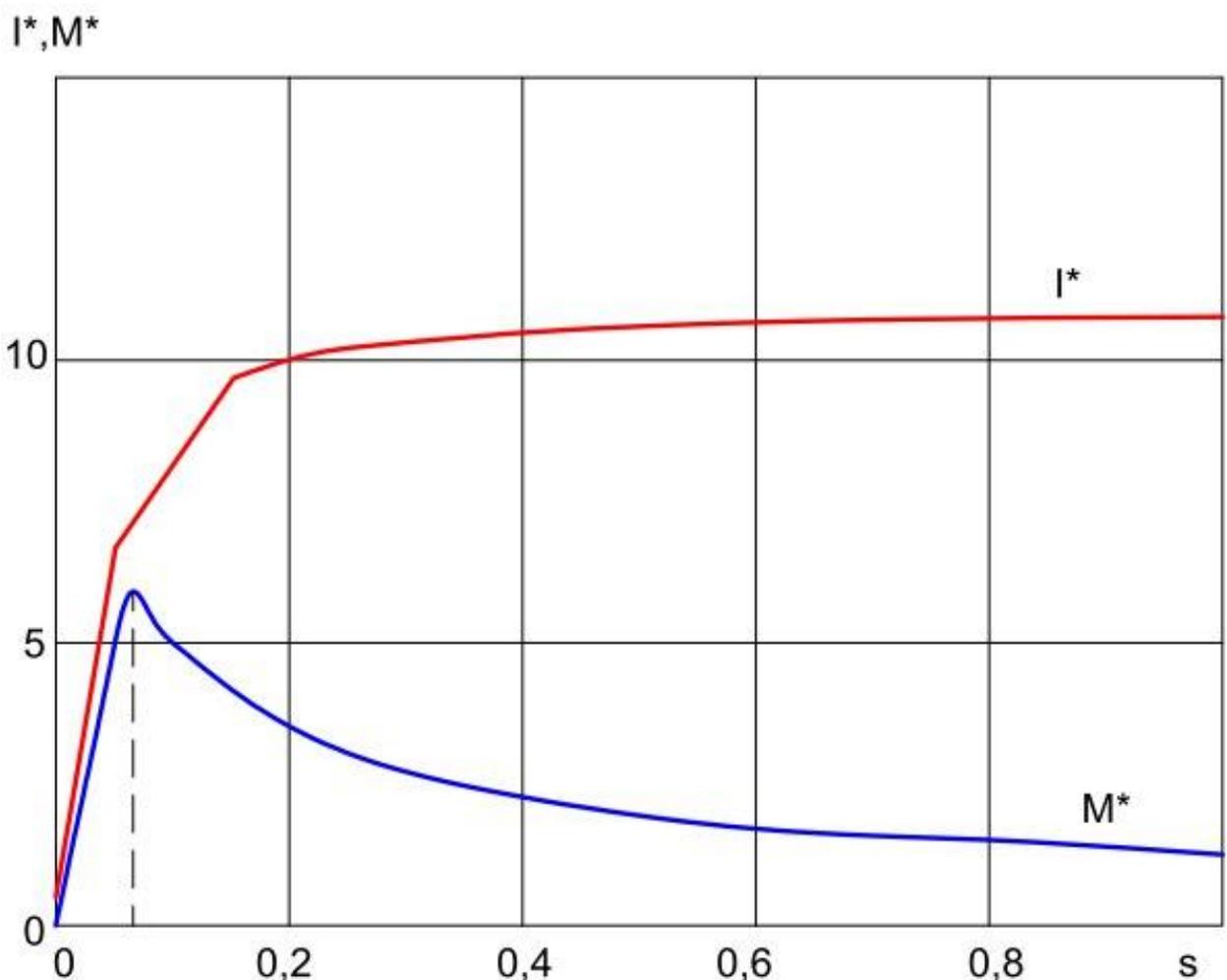


Рисунок 5 – Пусковые характеристики асинхронного двигателя

## 2. Механический расчет

Электрические машины общего назначения в большинстве случаев выполняют с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несёт на себе всю массу вращающихся частей, через него передаётся вращающий момент машины.

При сочленении машины с исполнительным механизмом через ремённую и зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть

достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал также должен иметь достаточную жёсткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины.

Валы изготавливают из углеродистых сталей, преимущественно сталь 45. Для повышения механических свойств материала его подвергают термической обработке.

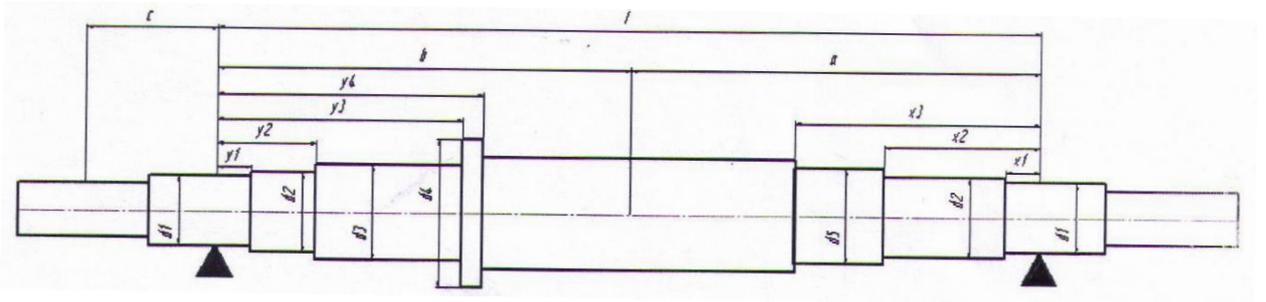


Рисунок 6 – Эскиз вала

Таблица 7- Размеры участков вала

a	b	c	1	y1	y2	y3	y4	x1	x2	x3
мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм
498,5	468	172,2	966,6	24,8	87,8	271,8	292,3	24,8	199,8	322,8

## 2.1 Расчет вала на жесткость

Рассчитаем вал на жесткость. Для этого определим массу ротора [1]:

$$m_p = 6500 \cdot D_2^2 = 6500 \cdot 0,437^2 \cdot 0,4 = 496,5 \text{ кг}$$

Определим момент инерции участка вала [1]:

$$J_1 = \pi \cdot d_1^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,1^4 / 64 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$J_2 = \pi \cdot d_2^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,11^4 / 64 = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4$$

$$J_3 = \pi \cdot d_3^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,12^4 / 64 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

$$J_4 = \pi \cdot d_4^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,16^4 / 64 = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

$$J_5 = \pi \cdot d_5^4 / 64 = 3,14 \cdot 0,124^4 / 64 = 1,16 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$$

Тогда приближенное значение силы тяжести:

$$G_p = 9,81 \cdot m_p = 9,81 \cdot 496,5 = 4870 \text{ Н}$$

Определим прогиб вала в середине сердечника ротора под действием силы тяжести.

Для асинхронного двигателя с  $h=355$  мм с достаточным приближением можно принять коэффициенты [1]:

$$\begin{aligned} s_a &= \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} = \frac{(x_3^3 - x_2^3)}{J_2} + \frac{(x_3^3 - x_1^3)}{J_5} \\ &= \frac{((322,8 \cdot 10^{-3})^3 - (199,8 \cdot 10^{-3})^3)}{7,2 \cdot 10^{-6}} \\ &\quad + \frac{((322,8 \cdot 10^{-3})^3 - (248 \cdot 10^{-3})^3)}{1,16 \cdot 10^{-5}} = 6,5 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_b &= \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = \frac{(y_4^3 - y_3^3)}{J_3} + \frac{(y_4^3 - y_2^3)}{J_2} + \frac{(y_4^3 - y_1^3)}{J_1} \\ &= \frac{(0,2923^3 - 0,2718^3)}{1 \cdot 10^{-5}} + \frac{(0,2923^3 - 0,878^3)}{7,2 \cdot 10^{-6}} \\ &\quad + \frac{(0,2923^3 - 0,248^3)}{5 \cdot 10^{-6}} = 8,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} s_o &= \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i} = \frac{(y_4^2 - y_3^2)}{J_3} + \frac{(y_4^2 - y_2^2)}{J_2} + \frac{(y_4^2 - y_1^2)}{J_1} \\ &= \frac{(0,2923^2 - 0,2718^2)}{1 \cdot 10^{-5}} + \frac{(0,2923^2 - 0,878^2)}{7,2 \cdot 10^{-6}} \\ &\quad + \frac{(0,2923^2 - 0,248^2)}{5 \cdot 10^{-6}} = 2,9 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1} \end{aligned}$$

Прогиб вала под действием силы тяжести [1]:

$$\begin{aligned}
 f_G &= \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) \\
 &= \frac{4870}{3 \cdot (0,9666)^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} \\
 &\quad \cdot ((498,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 8,85 \cdot 10^3 + (468 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 6,5 \cdot 10^3) \\
 &= 3 \cdot 10^{-5} \text{ м}
 \end{aligned}$$

где:  $E=2,06 \cdot 10^{11}$  Па – модуль упругости материала вала (для стали)

Определим номинальный вращающий момент [1]:

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot \frac{P_{2\text{НОМ}}}{n_c \cdot (1 - s_n)} = 9,55 \cdot \frac{200 \cdot 10^3}{1500 \cdot (1 - 0,0045)} = 1280 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Реакция передачи равна [1]:

$$F_{\text{П}} = \frac{k_n}{r} \cdot M_{\text{НОМ}} = \frac{0,3}{0,05} \cdot 1280 = 7680 \text{ Н}$$

где  $k_n=0,3$  – коэффициент при передаче упругой кулачковой муфтой [1].

Прогиб вала посередине сердечника ротора от реакции передачи составит [1]:

$$\begin{aligned}
 f_{\text{П}} &= \frac{F_{\text{П}} \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot ((1,5 \cdot l \cdot S_0 - S_b) \cdot a + b \cdot S_a), \\
 f_{\text{П}} &= \frac{7680 \cdot 0,1722}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,9666^2} \\
 &\quad \cdot ((1,5 \cdot 0,9666 \cdot 2,9 \cdot 10^4 - 8,85 \cdot 10^3) \cdot 0,4985 + 0,468 \cdot 6,5 \\
 &\quad \cdot 10^3) = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}
 \end{aligned}$$

Начальный эксцентриситет ротора составит [1]:

$$e_0 = 0,1 \cdot \delta + f_G + f_{\text{П}} = 0,1 \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-5} + 4,5 \cdot 10^{-5} = 1,95 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения [1]:

$$f_T = f_G \cdot \frac{T_o}{G_p} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{8351}{4870} = 5,14 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Установившийся прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения [1]:

$$f_M = \frac{f_T}{1 - \frac{f_T}{e_o}} = \frac{5,14 \cdot 10^{-5}}{1 - 5,14 \cdot \frac{10^{-5}}{1,95} \cdot 10^{-4}} = 7 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Результирующий прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения, реакции передачи и магнитного притяжения [1]:

$$f = f_G + f_{\Pi} + f_M = 3 \cdot 10^{-5} + 4,5 \cdot 10^{-5} + 7 \cdot 10^{-5} = 14,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

Результирующий прогиб вала не должен превышать 12% воздушного зазора. Проверим это условие.

$$x = \frac{f}{\delta} \cdot 100\% = \frac{14,5 \cdot 10^{-5}}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot 100\% = 12\%$$

Первая критическая частота вращения вала с учетом влияния магнитного притяжения [1]:

$$n_{кр} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{f_T}{e_o}}{f_G}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - 5,15 \cdot \frac{10^{-5}}{1,95} \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-5}}} = 4700 \text{ об/мин}$$

Полученное значение должно удовлетворять неравенству:

$$n_{кр} > 1,3 \cdot n_c (1 - s_n)$$

Проверим это условие  $1,3 \cdot n_c (1 - s_n) = 1,3 \cdot 1500 \cdot (1 - 0,0045) = 1941 \text{ об/мин}$   $4700 > 1941$ , условие выполняется.

## 2.2. Расчет на прочность

$$T = \frac{T_o}{1 - \frac{f_T}{e_o}} = \frac{8351}{1 - 5,14 \cdot \frac{10^{-5}}{1,95} \cdot 10^{-4}} = 11340$$

Изгибающий момент в сечении «а»:

$$M_{ИА} = (k \cdot F_{II} \cdot c + (G_p + T) \cdot b) \cdot \frac{x_i}{l} = (2 \cdot 7680 \cdot 0,1722 + (4870 + 11340) \cdot 0,468) \cdot \frac{0,3228}{0,9666} = 3414 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

где: К – коэффициент перегрузки,  $K=2 \div 2,5$ . Принимаем  $K=2$  [1].

Момент сопротивления при изгибе [1]:

$$W_A = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,09^3 = 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

Напряжение изгиба [1]:

$$\begin{aligned} M_{ИВ} &= k \cdot F_{II} \cdot c \cdot \left(1 + \frac{y_i}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{a \cdot y_i}{l} \\ &= 2 \cdot 7680 \cdot 0,1722 \cdot \left(1 + \frac{0,2923}{0,9666}\right) + (4870 + 11340) \\ &\quad \cdot \frac{0,4985 \cdot 0,2923}{0,9666} = 5888 \text{ Н}\cdot\text{м} \end{aligned}$$

Момент сопротивления при изгибе:

$$W_B = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,1^3 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{прВ} = \frac{\sqrt{M_{ИВ}^2 + (k \cdot a \cdot M_2)^2}}{W_B} = \frac{\sqrt{5888^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 1280)^2}}{1 \cdot 10^{-4}} = 6,23 \cdot 10^7$$

Сопоставляя полученные данные видим, что наиболее нагруженным сечением является сечение А для которого  $\sigma_{прА} = 6,23 \cdot 10^7 \leq 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5$  (Па), где предел текучести для стали  $45 \cdot 36000 \cdot 10^5$  (Па).

Условие прочности выполняется.

### 2.3 Выбор подшипников

#### Обоснование выбора подшипников

В электрических машинах с горизонтальным расположением валов подшипники выполняют роль поддерживающих опор. Они воспринимают действие силы тяжести ротора, силы одностороннего притяжения, сил продольных нагрузок от приводных механизмов.

В электрических машинах с горизонтальным расположением вала, в основном применяют радиальные однорядные шарико- и роликоподшипники. Радиальные шарикоподшипники могут кроме радиальной нагрузки воспринимать еще и некоторую осевую нагрузку. При повышенном радиальном зазоре между шариками и дорожками качения колец подшипник приобретает свойства радиально-упорного подшипника и хорошо работает на восприятие осевых нагрузок. При выборе подшипников определяют приведенную нагрузку  $Q$ , а также учитывают частоту вращения  $n$  подшипника и требуемый срок службы  $L_D$ , находят динамическую грузоподъемность  $C$  (Н), которая и является основной характеристикой подшипника. [1]

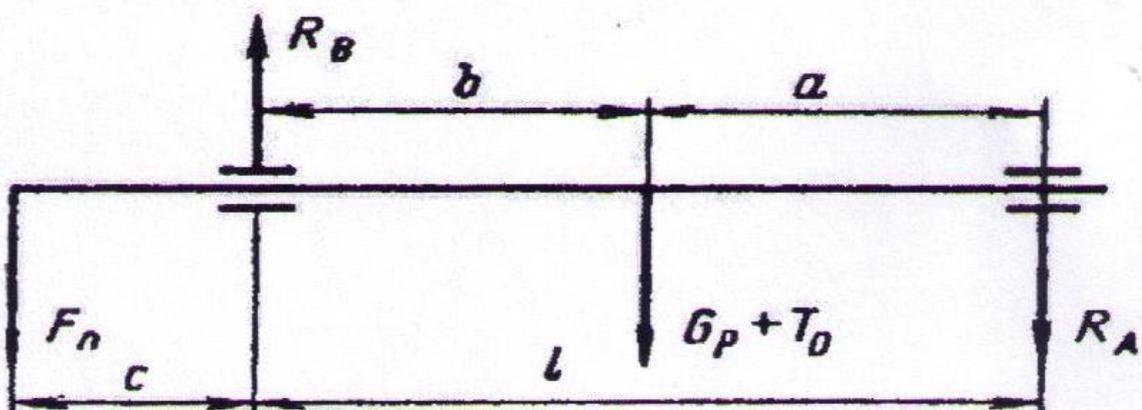


Рисунок 7 – К определению радиальных нагрузок

Радиальная нагрузка на подшипник [1]:

$$R_b = F_{II} \cdot \frac{(l + c)}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{a}{l}$$

$$= 7680 \cdot \frac{(0,9666 + 0,1722)}{0,9666} + (4870 + 8351) \cdot \frac{0,4985}{0,9666} = 15870 \text{ Н}$$

Приведенная динамическая нагрузка для однорядных радиальных шарикоподшипников [1].

Принимаем нагрузку с умеренными толчками ( $k_H = 1,5$  – коэффициент, учитывающий характер нагрузки двигателя).

$$Q_b = k_H \cdot R_b = 1,5 \cdot 15870 = 23805 \text{ Н}$$

Динамическая грузоподъемность для шарикоподшипников [1]. Так как в задании не оговорено конкретных сроков службы двигателя (подшипника) принимаем его равным 20000 часов. Тогда

$$C_b = \frac{Q_b}{25,6} \cdot \sqrt[3]{L_D \cdot n_c} = \frac{23805}{25,6} \cdot \sqrt[3]{20000 \cdot 1500} = 288900 \text{ Н}$$

Аналогично радиальная нагрузка на подшипник [1]

$$R_a = F_{II} \cdot \frac{c}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{b}{l} = 7680 \cdot \frac{0,1722}{0,9666} + (4870 + 8351) \cdot \frac{0,468}{0,9666}$$

$$= 7769 \text{ Н}$$

Приведенная динамическая нагрузка для однорядных радиальных шарикоподшипников [1]:  $Q_a = k_H \cdot R_a = 1,5 \cdot 7769 = 11654 \text{ Н}$

Динамическая грузоподъемность для шарикоподшипников [1]

$$C_a = \frac{Q_a}{25,6} \cdot \sqrt[3]{L_D} = \frac{11654}{25,6} \cdot \sqrt[3]{20000 \cdot 1500} = 141500 \text{ Н}$$

Выбираем шарикоподшипник 180320 (1)

### 3. Тепловой и вентиляционный расчеты

Расчет нагрева проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима, но потери в изолированных обмотках статора

несколько увеличивают по сравнению с расчетными. Предполагая, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры при классе нагревостойкости изоляции F – до 155°C. При этом коэффициент увеличения потерь  $k_\rho$  по сравнению с полученными значениями для расчетной температуры составит  $k_\rho = 1,15$ .

3.1 Электрические потери в лобовых частях катушек [1]:

$$P'_{\text{эл.п.1}} = k_\rho \cdot P_{\text{эл.п.1}} \cdot \frac{2 \cdot l_\delta}{l_{\text{ср1}}} = 1,15 \cdot 3512 \cdot \frac{2 \cdot 0,4}{1,74} = 1857 \text{ Вт}$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя [1]:

$$\Delta v_{\text{пов1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{эл.п.1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_\delta \cdot a_1}$$

где  $a_1$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности [1] зависит от  $D_a$

$$a_1 = 100 \text{ Вт(м}^2 \cdot \text{°C)}$$

$K$  – коэффициент учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду [1] зависит от  $2r$   $K=0,2$ .

тогда:

$$\Delta v_{\text{пов1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{эл.п.1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_\delta \cdot a_1} = 0,2 \cdot \frac{1857 + 4072}{3,14 \cdot 0,44 \cdot 0,4 \cdot 100} = 21,4^\circ\text{C}$$

Расчетный периметр поперечного сечения паза статора для полузакрытых трапецеидальных пазов [1]:

$$P_1 = 2 \cdot (h_{n1} + h_{nq}) = 2 \cdot (0,0414 + 0,0131) = 0,109 \text{ м}$$

3.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора [1]:

$$\Delta v_{\text{из.п.1}} = \frac{P'_{\text{э.п.1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left( \frac{b_{\text{из.п.1}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right)$$

где:  $\lambda_{\text{ЭКВ}}$  – средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции; для классов нагревостойкости В F и H  $\lambda_{\text{ЭКВ}} = 0,16 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)}$ ;

$$\frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} = 0 \text{ – для обмоток из прямоугольного провода [1]}$$

тогда:

$$\Delta v_{\text{из.п.1}} = \frac{P'_{\text{э.п.1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left( \frac{b_{\text{из.п.1}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right) = \frac{1857}{60 \cdot 0,109 \cdot 0,4} \cdot \left( \frac{3,2 \cdot 10^{-3}}{0,16} + 0 \right) = 14,2^{\circ}\text{C}$$

3.3 Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей [1]

$$\Delta v_{\text{из.л.1}} = \frac{\lambda'_{\text{э.л.1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left( \frac{b_{\text{из.л.1}}}{\lambda_{\text{ЭКВ}}} + \frac{h_{\text{П}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} \right) = \frac{664 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 60 \cdot 0,109 \cdot 0,4} \cdot \left( \frac{0,05 \cdot 10^{-3}}{0,16} \right) = 0,111^{\circ}\text{C}$$

$$\frac{h_{\text{П}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{ЭКВ}}} = 0 \text{ – для обмоток из прямоугольного провода [1]}$$

3.4 Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя [1]:

$$\Delta v_{\text{пов.л.1}} = \frac{K \cdot \lambda'_{\text{э.л.1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{выл}} \cdot a_1} = \frac{0,2 \cdot 664}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,44 \cdot 0,151 \cdot 100}$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя [1]:

$$\Delta \dot{v}'_1 = \frac{(\Delta v_{\text{пов.л.1}} + \Delta v_{\text{из.л.1}}) \cdot 2 \cdot l_{\delta} + (\Delta v_{\text{из.л.1}} + \Delta v_{\text{пов.л.1}}) \cdot 2 \cdot l_{\text{л}}}{l_{\text{ср1}}} = \frac{(21,4 + 14,2) \cdot 2 \cdot 0,4 + (3,2 + 0,111) \cdot 2 \cdot 0,4}{1,74} = 17,9^{\circ}\text{C}$$

3.5 Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется в предположении, что температура корпуса равна температуре воздуха внутри машины [1]:

$$\Delta v_B = \frac{\sum P_B'}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_B}$$

где:  $\sum P_B'$  – сумма потерь отводимых в воздух внутри двигателя [1]:

$$\sum P_B' = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эл.1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0,9 \cdot P_{\text{мех}}$$

$$\text{где: } \sum P' = \sum P + (k_\rho - 1) \cdot (P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) = 188873 + (1,15 - 1) \cdot (3512 + 955) = 19543 \text{ Вт}$$

тогда:

$$\sum P_B' = 19543 - (1 - 0,2) \cdot (1857 + 4072) - 0,9 \cdot 1887 = 13101 \text{ Вт}$$

$S_{\text{кор}}$  – эквивалентная поверхность охлаждения корпуса [1]:

$$S_{\text{кор}} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_\delta + 2 \cdot l_{\text{выл}}) = (3,14 \cdot 0,66 + 8 \cdot 0,55) \cdot (0,4 + 2 \cdot 0,151) = 4,55 \text{ м}^2$$

где  $\Pi_p$  – условный периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя [1]:

$$\Pi_p = 0,55 \text{ м зависит от } h;$$

$\alpha_B$  – коэффициент подогрева воздуха учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха

внутри машины [1]  $\alpha_B = 75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  зависит от  $D_a$ .

тогда:

$$\Delta v_B = \frac{\sum P_B'}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_B} = \frac{13101}{4,55 \cdot 70} = 41,2 \text{ °C}$$

3.6 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды [1]:

$$\Delta v_1 = \Delta v'_1 + \Delta v_B = 17,9 + 41,2 = 59^\circ\text{C}$$

При температуре окружающей среды  $+40^\circ\text{C}$  над уровнем не более 1000 м предельно допустимая температура составляет  $100^\circ\text{C}$  - для класса нагревостойкости F. Данное условие выполняется.

Вентиляционный расчет асинхронных двигателей, так же как и тепловой, на первоначальном этапе проектирования может быть выполнен приближенным методом, который заключается в сопоставлении расхода воздуха необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

3.7 Требуемый для охлаждения расход воздуха [1]:

$$\theta_B = \frac{k_m \cdot \sum P_B'}{1100 \cdot \Delta v_B}$$

где  $k_m$  – коэффициент учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса обдуваемого наружным вентилятором [1]:

$$k_m = m' \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_a} = 2,5 \cdot \sqrt{\frac{1500}{100} \cdot 0,66} = 7,87$$

где  $m'=2,5$  для двигателей с  $2p=4$  при  $h=355$  мм

тогда:

$$\theta_B = \frac{k_m \cdot \sum P_B'}{1100 \cdot \Delta v_B} = \frac{7,87 \cdot 13101}{1100 \cdot 41,2} = 2,27 \text{ м}^3/\text{с}$$

3.8 Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором [1]:

$$\theta_B = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot (0,66)^3 \cdot \frac{1500}{100} = 2,58 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход воздуха  $\theta_B$  должен быть больше требуемого для охлаждения машины  $\theta_B$  значения соответствуют требованиям  $\theta'_B > \theta_B$

## Заключение

В процессе выполнения данной выпускной квалификационной работы был спроектирован взрывозащищенный асинхронный асинхронный двигатель мощностью  $P_{2H}=200$  кВт, частотой вращения  $n=1500$  об/мин, числом полюсов  $2p=4$ , напряжением  $U_H=6000$  В.

В электромагнитном расчете были выбраны главные размеры, определены параметры двигателя, масса активных материалов, потери и КПД, а также рассчитаны рабочие и пусковые характеристики, кратность пускового тока и максимального момента, удовлетворяющие требованиям, предъявляемым к двигателю.

Обмотка статора выбрана двухслойной, катушечной из жестких секций. Для обмотки статора применена изоляция класса F, которая допускает длительный нагрев обмотки статора до  $155^{\circ}$  С.

Короткозамкнутая обмотка ротора- сварная из меди.

Механический расчет вала показал, что жесткость, прочность и критическая частота вращения вала удовлетворяют требуемым условиям.

Тепловой расчет показал, что у двигателя имеется температурный запас при нагреве обмотки статора, а вентилятор обеспечивает расход воздуха почти с двукратным запасом.

При выполнении технологической части выпускной квалификационной работы был разработан технологический процесс общей сборки спроектированного двигателя. Выбрано оборудование и оснастка. Определены нормы времени и необходимое количество оборудования для выполнения требуемой программы выпуска.

В разделе «Социальная ответственность» проведен анализ опасных и вредных факторов, возникающих в процессе сборки двигателя. Освещены вопросы техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности. Проведен расчет освещения для участка сборки.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» рассчитана себестоимость изготовления спроектированного двигателя. Произведен расчет получаемой прибыли определены точка безубыточности и диапазон безопасности.

В специальной части был спроектирован энергосберегающий АД предназначенный для привода вентиляторов главного проветривания.

В специальной части с целью повышения энергетических показателей двигателя увеличивали длину магнитопровода на (5...15)%, при сохранении геометрии поперечного сечения.

В целом спроектированный взрывозащищенный асинхронный двигатель удовлетворяет требованиям, определенным заданием.

Таким образом был спроектирован энергосберегающий высоковольтный АД предназначенный для вентилятора главного проветривания у которого КПД увеличен на 1,2% выше по сравнению с базовым двигателем за счет числа витков в обмотке фазы статора.

## Список используемых источников

1. Проектирование электрических машин: Учеб. Для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Капылова – 3-е изд., испр. И под.- М.: Высш. Шк., 2002.- 757 с.: ил.
2. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник А.Э. Кравчик и др.- М.: Энергоатомиздат 1982.- 504 с.
3. Конструирование асинхронных двигателей. Методические указания к выполнению курсового проекта для студентов электрических специальностей ТПУ дневной, заочной и вечерней форм обучения. – Томск: изд. ТПУ 1994.- 28 с. Составители: Жадан В.А., Игнатович В.М., Ройз Ш.С.
4. Проектирование электрических машин. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С / под редакцией Гольдберга О.Д. 2-е изд., перераб. и дополненное: М.: «высшая школа» 2001.- 430 с.
5. Антонов В.М. Технология производства электрических машин: Учебник для вузов.- 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1993-592 с.: ил.
6. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Малосерийное и среднесерийное производство. –М.: Машиностроение, 1974.
7. Допуски и посадки: Справочник. В 2-х ч. / В.Д. Мягков, М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. - Ч. 1.543 с., ил.
8. Технология и оснащение сборочного производства машиностроения: Справочник. / Под ред. В.К. Замятина – М.: Машиностроение, 1995. - 607 с.

9. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение 1985. - 655 с.
10. СанПин 2.2.4.548-96 г. Гигиенические требования к микроклимату производственного помещения.
11. СНиП 23-05-95 г. Естественное и искусственное освещение.
12. НПБ 105-03. Нормы пожарной безопасности. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
13. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: «Знак», 2001- 440 с.
14. В.Н. Смагин. Экономика предприятия: учебное пособие - 2 – изд., испр. – М.: КНОРУС, 2007-160 с.
15. Крушвиц Л.Н. Инвестиционные расчеты – сб.: Санкт-Петербург, 2001 г.
16. [www.electrodivigateli.net](http://www.electrodivigateli.net)
17. Планирование на предприятии: Учебное пособие для вузов / А.И. Ильин. – 2-е изд., перераб. Минск: Новое знание, 2001. – 634с.: ил.
18. Электричество. 2007 г. № 52 с. Муравлева О.О.

