

## Реферат

Выпускная квалификационная работа \_\_\_\_\_ 136 \_\_\_\_\_ с., \_\_\_\_\_ 13 \_\_\_\_\_ рис., \_\_\_\_\_ 15 \_\_\_\_\_ табл., \_\_\_\_\_ 17 \_\_\_\_\_ источников литературы, \_\_\_\_\_ 5 \_\_\_\_\_ прил., \_\_\_\_\_ 6 \_\_\_\_\_ листов графического материала.

Ключевые слова: Асинхронный двигатель, ротор, статор, обмотка статора, крановый, кратность пускового тока, кратность пускового момента.

Объектом исследования является Двигатель механизма подъема мостового крана экскаватора ЭШ-10/70.

Цель работы – спроектировать асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для механизма подъема мостового крана. Сконструировать и рассчитать отдельные части машины. Спроектировать технологический процесс сборки ротора.

В процессе исследования проводились расчеты в программе MathCad 14, графическое проектирование в Компасс-3Dv14

В результате исследования был спроектирован асинхронный двигатель полностью удовлетворяющий заданию.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: оценена конструкции, составлена схема сборки ротора асинхронного двигателя и его маршрутная карта

Область применения: Механизм подъема мостового крана.

## Введение

В связи с ростом механизации производственных процессов в различных отраслях промышленности значительно увеличилось производство краново-подъемных механизмов и электродвигателей.

Специальные серии крановых электродвигателей типа 4МТ характеризуются повторно-кратковременным режимом работы при высокой частоте включений, большим диапазоном регулирования частоты вращения, высокой кратностью пусковых и перегрузочных моментов. Двигатели обязаны обеспечивать режим электрического торможения, в том числе режим противовключения.

Двигатели приводов крановых механизмов работают в условиях высокой вибрации и тряски, а также при высокой температуре окружающей среды (до 70°C). К крановым электродвигателям предъявляются высокие требования по надежности и удобству обслуживания и эксплуатации в трудных условиях эксплуатации крановых двигателей. Асинхронные двигатели должны работать как в внутри помещений, так и на открытом пространстве, допускать удобное сочленение с механическим тормозом и иметь необходимые конструктивные модификации, подходящие к требованиям современных подъемных механизмов. Величины маховых масс якорей и роторов должны быть минимальными.

Крановые электродвигатели широко применяются на кранах всех видов, карьерных экскаваторах и не только, вспомогательных металлургических приводах и других механизмах с ПВ режимом работы. Областью применения электродвигателей с короткозамкнутым ротором является также привод кран-балок, тельферов, небольших крановых тележек и других механизмов со сравнительно небольшой частотой включений.

Эти двигатели должны обладать повышенными перегрузочными способностями при возможно меньшем значении махового момента ротора

для обеспечения малых времен разгона и торможения механизма, уменьшения пусковых и тормозных потерь в двигателе.

Важнейшей конструктивной особенностью крановые машины с короткозамкнутым ротором является монолитность ротора, детали которого должны быть надежно закреплены на валу, а короткозамкнутая обмотка плотно заполнять пазы.

Особенностями конструкции крановых асинхронных машин сравнительно с конструкциями машин нормальных серий являются повышенная механическая прочность отдельных элементов конструкции.

В отличие от машин нормальных серий ротор кранового двигателя спрессовывается нажимными шайбами и запирается втулкой путем прессовой и горячей посадки. Станины и щиты изготавливаются из чугуна. Пакет статора закрепляется во избежание поворачивания осевой шпонкой и зажимными кольцами. Все крепежные детали и прочие резьбовые соединения крановых электродвигателей имеют предохранение от самоотвинчивания, а крепление частей машины выполняется с повышенной степенью надежности.

ВКР посвящена:

- проектированию асинхронного кранового электродвигателя с короткозамкнутым ротором на базе кранового двигателя 4МТКН 132 LB6 с короткозамкнутым ротором;
- разработке технологического процесса сборки ротора асинхронной машины;
- расчету экономической конкурентоспособности производства данного асинхронного электродвигателя;
- рассмотрению предмета социальной ответственности и охраны окружающей среды при осуществлении общей сборки ротора асинхронного двигателя, разработка мер противопожарной безопасности и меры защиты труда.

## 5 Специальная часть

Мы просчитали электромагнитный расчет проектируемого двигателя. Теперь нужно произвести изменения в двигателе, чтобы кратность пускового момента была выше рассчитанного. Для начала поясним что значит крановый электродвигатель и какими параметрами он должен обладать.

Двигатель должен иметь высокую перегрузочную способность, удовлетворять требованиям по исполнению конструкции условиям окружающей среды. Если сравнивать с обычными машинами общего применения они имеют корпус выполненный из более прочных материалов, улучшенную изоляцию, большие зазоры между статором и ротором. Требования предъявляемые к их надежности и удобству обслуживания в трудных условиях эксплуатации крановых двигателей крайне высоки. Они должны иметь удобное соединение с любым редуктором и механическим тормозом. Их конструкции должны удовлетворять требованиям, предъявляемым к современным грузоподъемным двигателям.

Продолжительно кратковременный режим резко отличается от продолжительного, когда обычный электродвигатель выполняет работу с неизменной нагрузкой в течение пары часов.

Электродвигатели крановых механизмов работают при высоких температурах воздуха, и при повышенных вибрациях. Крановые двигатели должны быть пригодны для эксплуатации как в закрытых помещениях, так и на открытом пространстве и для установки на любых крановых механизмах.

Крановые электродвигатели используют не только на кранах, но и при других случаях когда работа выполняется в повторно-кратковременном режиме, как пример для привода вспомогательных механизмов в металлургии, различных

подъемно-транспортных устройствах. Исходя из этого они и получили общее название краново-металлургических двигателей.

Для улучшения пусковых характеристик АД является снижение пускового тока, величина которого прямо пропорциональна величине приложенного напряжения и обратно пропорциональна импедансу  $Z$  статора при неподвижном роторе. Для этого используются схемы пуска при пониженном напряжении на обмотках статора. После прохождения пика пускового тока и трогания двигателя двигатель переводится на нормальную схему электропитания. Варианты пуска.

1. Самая распространённая схема Для двигателя со схемой соединения обмоток "звезда-треугольник" и нормальным соединением "треугольник". Пуск производится с соединением "звезда" с последующим переключением в "треугольник". При этой схеме пуска напряжение на обмотке статора уменьшено в 1,73 раза.

2. Пуск с подключением обмотки статора через дополнительные пусковые сопротивления с последующим их выводом. Это индуктивные сопротивления, ёмкостные или для двигателей не большой мощности - активные.

3. Автотрансформаторный пуск.

Еще один способ улучшения пусковых характеристик это на роторе двигателя применяют специальную форму паза. При этом, внешняя от оси вращения часть паза ротора имеет сечение меньшее, чем внутренняя. Это позволяет использовать эффект вытеснения тока, с помощью которого увеличивается активное сопротивление обмотки ротора при больших скольжениях (при пуске). так же с двойной беличьей клеткой короткозамкнутым ротором

Так и мы для улучшения наших характеристик используем паз в виде 2ой беличьей клетки и сравним с рассчитанным ранее в электромагнитном расчете.

Все расчеты статора у нас останутся такие же, а вот ротор посчитаем снова.

## 5.1 Расчет ротора с двойной беличьей клеткой

Для начала выберем величину воздушного зазора и будем руководствоваться данными серийных двигателей [1, с.367, ф.9.50]

При выборе воздушного зазора следует руководствоваться данными стандартных двигателей [1, с.367, ф.9.50]

Правильный выбор воздушного зазора определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, которое составляет большую часть суммарной МДС магнитной цепи всего двигателя. Следовательно уменьшение зазора приводит к уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока машины, вследствие чего возрастает его коэффициент мощности и сокращаются потери в меди обмотки статора. Но сильное уменьшение воздушного зазора приводит к повышению амплитуд пульсаций индукции в воздушном зазоре и к повышению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень малыми зазорами не становится лучше, а часто даже становится меньше. В современных асинхронных машинах выбирают зазор, исходя из минимума суммарных потерь;

$$\delta = 0,35 \cdot 10^{-3} \text{ , м .} \quad (5.1)$$

### 5.1.1 Число пазов ротора [1, с.373, табл.9.18].

Число пазов ротора следует выбирать особенно тщательно. Это объясняется тем, что в поле воздушного зазора машины помимо основной

присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав.

В результате взаимодействия токов и полей высших гармоник возникают электромагнитные моменты, которые при неблагоприятном соотношении  $Z_1$  и  $Z_2$  могут существенно ухудшать механическую характеристику двигателя, так как момент на валу машины является суммой моментов, обусловленных всеми взаимодействующими гармониками.

Исследования, проведённые для изучения влияния соотношений чисел зубцов на статоре и роторе на кривую момента, а также на шумы и вибрации, позволили определить наилучшие соотношения  $Z_1$  и  $Z_2$  для короткозамкнутых двигателей с различными числами  $2p$ .

При  $2p=6$  и  $Z_1=54$  принимаем  $Z_2=64$ .

В АД роторы двигателей с  $h \leq 132$  мм выполняются со скосом.

5.1.2 Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,162 - 2 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} = 0,1613 \text{ , м.} \quad (5.2)$$

Конструктивную длину сердечника ротора берём равной длине сердечника статора  $\ell_2 = \ell_1 = 0,139$  м. (5.3)

5.1.3 Зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,1613}{64} = 0,0079 \text{ , м.} \quad (5.4)$$

5.1.4 Внутренний диаметр ротора [1, с.385]:

$$D_j = D_B = k_B \cdot D_a = 0,23 \cdot 0,225 = 0,052 \text{ м} \quad (5.5)$$

сердечники роторов АД, при  $D_2 \leq 990$  мм, выполняются с непосредственной посадкой на вал при помощи горячей посадки, внутренний

диаметр ротора равен диаметру вала, где при  $h=132 \text{ мм}$ ,  $k_B=0,23$  [1, с.385, табл.9.19].

5.1.5 Ток в стержне ротора [1, с.370, ф.9.57]:

$$I_2 = k_i \cdot I_{\text{ном}} \cdot \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{\text{об1}}}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}} = 0,92 \cdot 16,5 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 0,96}{64 \cdot 1} = 196,64 \text{ , } A, \quad (5.6)$$

где коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на соотношение  $I_1/I_2$ , его приблизительное значение может быть рассчитано в зависимости от номинального  $\cos\varphi$ , которым задавались в начале расчета [1, с.346, рис.9.22] при  $\cos\varphi=0,83$

$$k_i = 0,91 \text{ .} \quad (5.7)$$

Коэффициент скоса пазов:

$$k_{\text{ск}} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{\gamma_{\text{ск}}}{2}\right)}{\gamma_{\text{ск}}} = \frac{2 \cdot \sin\left(\frac{0,1364}{2}\right)}{0,1364} = 0,999 \approx 1; \quad (5.8)$$

$$\gamma_{\text{ск}} = \beta_{\text{ск}} \cdot \frac{2p}{Z_2} = 1 \cdot \frac{2 \cdot 3}{64} = 0,1364; \quad (5.9)$$

$$\beta_{\text{ск}} = \frac{b_{\text{ск}}}{t_{z2}} = \frac{0,0079}{0,0079} = 1; \quad (5.10)$$

$$b_{\text{ск}}=t_{z2}=0,0079\text{м.}$$

5.1.6 Площадь поперечного сечения стержня [1, с.375]:

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{196,64}{3,5 \cdot 10^6} = 5,618 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2, \quad (5.11)$$

где  $J_2$  – плотность тока в стержне ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием  $J_2=(2,5-3,5) \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$  [1, с.375].  
Принимается  $J_2=3,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ .



### 5.1.7 Паз ротора.

Для обеспечения высоких энергетических показателей в номинальном режиме работы выбираем паз с двойной беличьей клеткой.

Предварительно принимаются значения индукции в следующих частях ротора. Зубцы ротора при постоянном сечении  $B_{z2}=1,85$  Тл

Ширина шлица  $b_{ш2}=1$  мм, высота шлица  $h_{ш2}=0,5$  мм [1, с.380].

Для расчета ротора с двойной клеткой примем высоту паза и, количество пазов и ширину паза из электромагнитного расчета, построим эскиз рис.1 и зададимся точными значениями конфигурации паза.

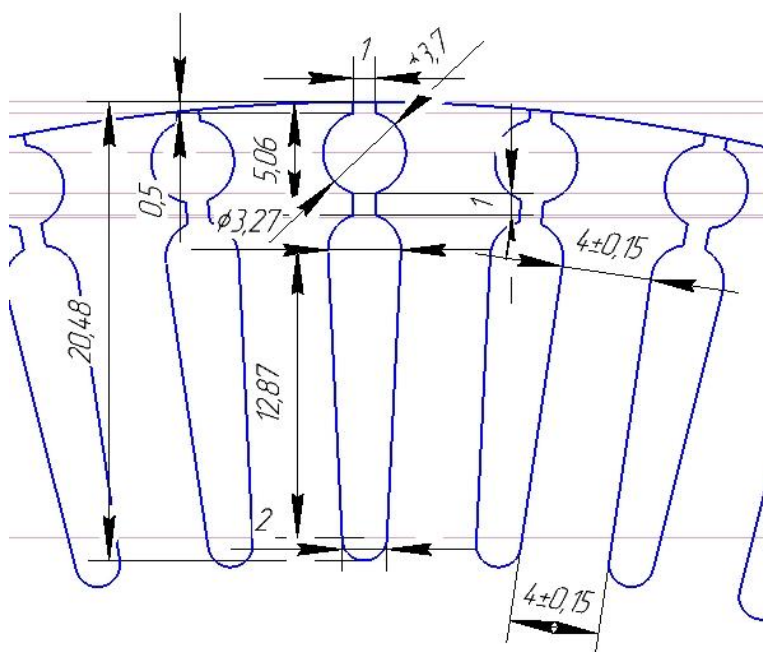


Рис 5.1 Эскиз паза ротора.

Полная высота паза  $h_{пр}=20,48$  мм, диаметр верхней части паза  $b_B=3,7$  мм, ширина зубца  $h_{зв}=0,9 \cdot b_B+h_{ш2}=0,9 \cdot 3,7+0,5=3,813$  мм

По эскизу  $b_{22}=2$  мм

Ширина большей части паза по эскизу  $b_{1p}=3,27$ , ширина меньшей части паза  $b_{2p}=2$  мм,  $h_{1p}=12,87$  мм.

Уточним площадь сечения стержня с  $q_c=51.82 \cdot 10^{-6}$  м

Плотность тока в стержне (окончательно);

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{196,635}{5,18 \cdot 10^{-5}} = 3,79 \cdot 10^6, \frac{A}{M^2}.$$

5.1.8 Ток в кольце [1, с.376. ф.9.70];

$$I_{кл} = \frac{I_2}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2}} = \frac{196,635}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 3}{64}} = 670,056, A. \quad (5.12)$$

5.1.9 Плотность тока в кольце [1, с.376];

$$J_{кл} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 3,79 \cdot 10^6 = 3,22 \cdot 10^6, \frac{A}{M^2}. \quad (5.13)$$

Плотность тока в короткозамыкающих кольцах выбираем примерно на 40% меньше, чем в стержнях. Это объясняется следующим образом. Так как короткозамыкающие кольца, имеют лучшие условия охлаждения по сравнению со стержнями, являются своего радиаторами, которые отводят тепло стержней, улучшая их охлаждение.

5.1.10 Расчет сечения короткозамкнутого кольца [1, с.376, ф.9.72]:

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{670,056}{3,22 \cdot 10^6} = 2,08 \cdot 10^{-4}, M^2. \quad (5.14)$$

5.1.11 Высота короткозамкнутого кольца [1, с.377];

$$h_{кл} = 1,2 \cdot h_{н2} = 1,25 \cdot 20,48 \cdot 10^{-3} = 25,6, мм \approx 26 \cdot 10^{-3}, м. \quad (5.15)$$

Расчет паза на этом заканчивается. Эскиз приведен на рис. 1

## 5.2. Расчёт магнитной цепи ротора с двойной беличьей клеткой

Расчёт намагничивающего тока будем проводить для режима холостого хода двигателя, при котором для асинхронных машин характерно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора.

5.2.1 Индукция в зубцах статора (окончательно):

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{b_{z1} \cdot k_c} = \frac{0,91 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3}}{4,6 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96} = 1,93, \text{ Тл.} \quad (5.16)$$

5.2.2 Индукция в зубцах ротора (окончательно):

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2}}{b_{z2} \cdot k_c} = \frac{0,91 \cdot 7,9 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96} = 1,87, \text{ Тл.} \quad (5.17)$$

5.2.3 Индукция в ярме статора (окончательно):

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 16 \cdot 10^{-3} \cdot 139 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96} = 1,39, \text{ Тл.} \quad (5.18)$$

5.2.4 Расчётная высота ярма ротора

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} = \frac{161,3 - 51,8 \cdot 10^{-3}}{2} - 20,6 \cdot 10^{-3} = 31 \cdot 10^{-3}, \text{ м.} \quad (5.19)$$

При посадке сердечника непосредственно на вал в двигателях с  $2p=6$  необходимо учитывать, что часть магнитных линий потока замыкается через вал.

5.2.5 Индукция в ярме ротора;

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot \ell_{cm2} \cdot k_c} = \frac{6,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 34 \cdot 10^{-3} \cdot 139 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96} = 0,816, \text{ Тл.} \quad (5.20)$$

Коэффициент воздушного зазора по (1, с.174, ф.4.16).

В связи с тем, что поверхности статора и ротора ограничивающие воздушный зазор имеют неровности: пазы, углубления для размещения бандажей и др. Магнитное сопротивление участков этого зазора в поперечном

сечении машины различается, следовательно распределение индукции по площади воздушного зазора будет неравномерно. Наибольшая неровность появляется из-за наличия зубцов на статоре и роторе. Над коронками зубцов магнитные линии потока учащаются, а над прорезами пазов плотность линии сокращается. В кривой индукции в воздушном зазоре появляются провалы. Магнитное сопротивление и магнитное напряжение воздушного зазора при неравномерной индукции увеличиваются.

Увеличение магнитного напряжения учитывается принятием коэффициента воздушного зазора. Этот коэффициент, выявленный расчётом полей в зазорах с разным соотношением ширины зубцов и пазов, демонстрирует насколько вырастает магнитное напряжение зазора при зубчатой поверхности статора или ротора в сравнении с магнитным напряжением зазора между поверхностями без неровностей.

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{9,4}{9,4 - 6,67 \cdot 0,35} = 1,329 ;$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{u1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{u1}}{\delta}} = \frac{3,5 / 0,35^2}{5 + 3,5 / 0,35} = 6,67 ;$$
(5.21a)

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{z2}}{t_{z2} - \gamma_2 \cdot \delta} = \frac{7,9}{9,4 - 1,039 \cdot 0,4} = 1,048 ;$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{u2}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{u2}}{\delta}} = \frac{1 / 0,35^2}{5 + 1 / 0,35} = 1,039 ;$$
(5.21b)

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1,329 \cdot 1,0481 = 1,3929 .$$
(5.22)

#### 5.2.6 Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6 = 1,59 \cdot 10^6 \cdot 0,91 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3} \cdot 1,393 = 711,4 , A .$$
(5.23)

5.2.7 Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора определяется по [1,с.387]:

$$\begin{aligned}
 F_{z1} &= 2 \cdot (F_{z21} + F_{z22}) \\
 \text{где } F_{z21} &= h_{z2\sigma} \cdot H_{z2\sigma} \\
 F_{z21} &= h_{z2H} \cdot H_{z2H}
 \end{aligned}
 \tag{5.24}$$

Для начала рассчитаем индукцию в зубцах ротора в нижней части и верхней части паза:

$$B_{z2H} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2}}{b_{z2H} \cdot k_c} = \frac{0,91 \cdot 7,9 \cdot 10^{-3}}{4,47 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96} = 1,87, \text{ Тл}$$

$$B_{z2\sigma} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2}}{b_{z2\sigma} \cdot k_c} = \frac{0,91 \cdot 7,9 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 0,96} = 1,87, \text{ Тл}$$

где напряженность в зубцах статора АД при индукции  $B_{z1}=1,93 \text{ Тл}$ ;  $H_{z1}=2070 \text{ А/м}$ . [1, с.461, табл.П.17].

Напряженность в зубцах ротора АД при индукции  $B_{z1}=1,87 \text{ Тл}$ ;  $H_{z1}=1890 \text{ А/м}$ . [1, с.461, табл.П.17].

5.2.8 Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$F_{z21} = h_{z2\sigma} \cdot H_{z2\sigma} = 2 \cdot 4,47 \cdot 10^{-3} \cdot 1890 = 8,44, \text{ А}; \tag{5.25}$$

Где  $h_{z2\sigma}$  по эскизу.

$$F_{z21} = h_{z2H} \cdot H_{z2H} = 20,55 \cdot 10^{-3} \cdot 1890 = 38,8, \text{ А}$$

$$F_{z1} = 2 \cdot (F_{z21} + F_{z22}) = 2(8,44 + 38,8) = 94,6$$

5.2.9 Коэффициент насыщения зубцовой зоны [1, с.391, ф.9.115]:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{64,58 + 94,5}{711,4} = 1,223. \quad (5.26)$$

Полученное значение коэффициента насыщения зубцовой зоны позволяет оценить правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемого двигателя. Если  $k_z > 1,5 \div 1,6$ , имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если  $k_z < 1,1$ , то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят большим.

5.2.10 Длина магнитной линии ярма статора:

$$L_a = \frac{\pi \cdot D_a - h_a}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 225 - 15,9 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} = 109 \cdot 10^{-3}, \text{ м}. \quad (5.27)$$

5.2.11 Длина магнитной линии ярма ротора:

$$L_j = \pi \cdot \frac{D_j + h_j}{2 \cdot p} = 3,14 \cdot \frac{54 + 32,81 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3} = 45,5 \cdot 10^{-3}, \text{ м}. \quad (5.28)$$

5.2.12 Магнитное напряжение ярма статора:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 109 \cdot 10^{-3} \cdot 635 = 69,52, \text{ А}, \quad (5.29)$$

где напряжённость магнитного поля ярма статора для стали 45 при индукции  $B_a = 1,39 \text{ Тл}$ ,  $H_a = 635 \text{ А/м}$ . [1, с.700, табл.П.1.9].

5.2.13 Магнитное напряжение ярма статора:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 45 \cdot 10^{-3} \cdot 129 = 5,809, \text{ А}, \quad (5.30)$$

где напряжённость магнитного поля ярма ротора для стали 45 при индукции  $B_j = 0,814 \text{ Тл}$ ,  $H_j = 129 \text{ А/м}$ . [1, с.700, табл.П.1.9].

5.2.14. Магнитное напряжение на пару полюсов:

$$F_\psi = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 711,4 + 64,56 + 72,11 + 69,55 + 5,8 = 921,4, \text{ А}. \quad (5.31)$$

5.2.15 Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\mu} = \frac{F_y}{F_{\delta}} = \frac{921,4}{711,4} = 1,33. \quad (5.32)$$

5.2.16 Намагничивающий ток:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_y}{0,9 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{об1}} = \frac{3 \cdot 921,4}{0,9 \cdot 3 \cdot 144 \cdot 0,9599} = 7,3 \text{ A} . \quad (5.33)$$

5.2.17 Относительное значение намагничивающего тока:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{ном}} = \frac{7,3}{16,54} = 0,443. \quad (5.34)$$

Относительное значение намагничивающего тока служит параметром правильности выбора и расчёта размеров и обмотки машины. Если  $I_{\mu}^* < 0,3 \div 0,35$ , то это говорит о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы мало использованы. Такая машина скорей всего будет иметь высокие КПД и  $\cos\varphi$ , но более плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большую массу и габариты. Если  $I_{\mu}^* > 0,5 \div 0,6$ , то это значит, что или его габариты взяты меньшими, либо некорректно приняты размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и  $\cos\varphi$  [1, с.391].

Рассчитаем и внесем данные в таблицу рабочие характеристики с учетом того что наш паз рис. 1. Все расчеты идентичны как в электромагнитном расчете.

Таблица 5.1 - Расчет рабочих характеристик

N п/п	Расчётная формула	Ед- ца	Скольжение						
			0,001	0,005	0,010	0,015	0,0356	<b>0,0406</b>	0,05
1	$a \cdot r_2'/s$		448	90	44,8	29,8	12,5	<b>11</b>	10,9
2	$b' \cdot r_2'/s$	ОМ	32,7	6,53	3,26	2	1,5	<b>0,81</b>	0,62
3	$R = a + a' \cdot r_2'/s$	ОМ	627	126	63,4	42,5	30,3	<b>18,4</b>	15,6
4	$X = b + b' \cdot r_2'/s$	ОМ	35,1	8,9	5,7	4,6	4,38	<b>3,34</b>	3,2
5	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	ОМ	628	126	63,4	42,8	30,62	<b>18,67</b>	16,02
6	$I_2'' = U_{n1}/Z$	А	0,35	1,74	3,45	5,14	7,18	<b>11,8</b>	13,7
7	$\cos \varphi_2' = R/Z$	–	0,9998	0,997	0,9952	0,9927	0,9897	<b>0,998</b>	0,98
8	$\sin \varphi_2' = X/Z$	–	0,055	0,075	0,0979	0,1208	0,143	<b>0,222</b>	0,2
9	$I_{1a} = I_{oa} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$	А	0,78	2,17	3,87	5,54	8,77	<b>12,05</b>	16,73
10	$I_{1p} = I_{op} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$	А	7,31	7,41	7,6	7,84	9,4	<b>9,8</b>	10,03
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	7,35	7,72	8,53	9,6	10,85	<b>15,2</b>	17,13
12	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	А	0,35	1,74	3,46	5,14	7,61	<b>12,9</b>	13,7
13	$P_1 = 3 \cdot U_1' \cdot I_{1a}$	Вт	518	1433	2558	3661	5010	<b>8893</b>	9168
14	$P_{s1} = 3 \cdot I_1'^2 \cdot r_1$	Вт	135	149	182	230	317,48	<b>698</b>	948



15	$P_{\Sigma 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2'$	Вт	0,23	5,7	22,5	50	91,64	<b>332</b>	354
16	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \cdot \frac{I_1}{I_{1н}}$	Вт	8,98	9,91	12,09	15,33	37	<b>48,77</b>	62
17	$\Sigma P = P_{\text{см}} + P_{\text{мех}} + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{доб}}$	Вт	460	481	532	611	717,5	<b>1393</b>	1453
18	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт Т	0,058	0,953	2,030	3,035	4,24	<b>7,5</b>	7,71
19	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	–	0,11	0,66	0,79	0,83	0,845	<b>0,829</b>	0,84
20	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	–	0,1	0,28	0,45	0,58	0,66	<b>0,7896</b>	0,81
Жирным шрифтом выделены номинальные параметры									

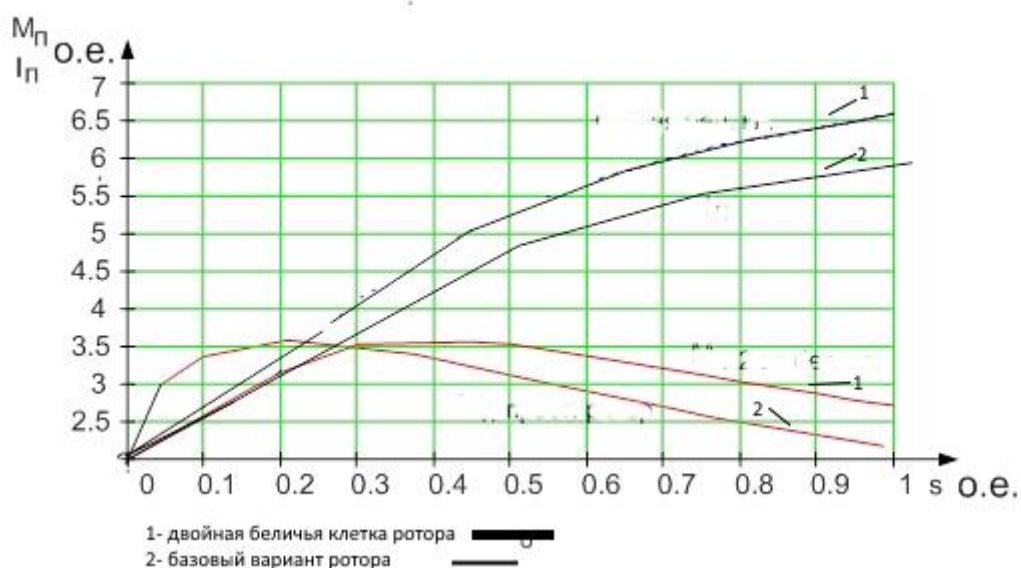
Пусковые характеристики рассчитываются по формулам приведенным в электромагнитном расчете. Полученные данные сносим в таблицу 5.2

Таблица 5.2

№	Расчётная формула	Ед	Скольжение S					0,001
			1	0,95	0,9	0,8	<b>0,3</b>	
1	$\xi = 65,15 h_c \sqrt{s}$	–	1,33	1,3	1,26	1,19	<b>0,73</b>	0,052
2	$\varphi(\xi)$	–	0,21	0,1866	0,094	0,0338	<b>0,015</b>	0,0038
3	$k_r = q_c / q_r$	–	1,023	1,01	1,05	1	<b>0,995</b>	0,98
4	$K_R = 1 + \frac{r_c'}{r_2} (k_r - 1)$	–	1,018	1,09	1,04	1	<b>0,996</b>	0,99
5	$r_{2\xi}' = K_R r_2'$	Ом	0,58	<sup>17</sup> 0,58	0,548	0,53	<b>0,525</b>	0,522

6	$k_d = \varphi'(\xi)$	–	0,9677	0,9729	0,9772	0,9823	<b>0,9856</b>	0,9898
7	$K_x = \Sigma \lambda_{2\xi} / \Sigma \lambda_2$	–	0,898	0,942	0,951	0,968	<b>0,973</b>	0,98
8	$x'_{2\xi} = x'_2 K_x$	ОМ	0,81	0,973	0,976	0,9942	<b>0,9987</b>	1
9	$x'_{2\xi_{нас}} = x'_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xi_{нас}}}{\Sigma \lambda_2}$	ОМ	0,541	0,63	0,58	0,71	<b>0,82</b>	0,96
10	$x_{1нас} = x_1 \frac{\Sigma \lambda_{1нас}}{\Sigma \lambda_1}$	--	0,7922	0,84	0,942	1,03	<b>1,103</b>	1,245
11	$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}}$	–	1,0306	1,0321	1,0331	1,0346	<b>1,0378</b>	1,0426
12	$R_{п.нас} = r_1 + c_{1п.нас} \frac{r'_{2\xi}}{s}$	ОМ	1,44	1,4676	1,502	1,586	<b>2,17</b>	4,85
13	$X_{п.нас} = X_{1нас} + c_{1п.нас} x'_{2\xi_{нас}}$	ОМ	1,63	1,78	1,95	2,103	<b>2,21</b>	2,55
14	$I'_{2нас} = \frac{U_{1НОМ}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}}$	А	111,5	110,2	108,8	105,5	<b>85,94</b>	43,67
15	$I_{1нас} = I'_{2нас} \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2 - X_{12п}}}{c_{1п.нас} \cdot X_{12п}}$	А	111,6	110,3	108,9	105,6	<b>85</b>	44,03
16	$I_{п*} = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1НОМ}}$	–	6,57	6,5	6,41	6,22	<b>5,07</b>	2,59
17	$M'_{п} = \left( \frac{I'_{2п.нас}}{I'_{2НОМ}} \right)^2 K_R \frac{S_{НОМ}}{S}$	–	2,708	2,784	2,864	3,03	<b>3,57</b>	2,77
<b>*Жирным шрифтом выделены значения при критическом скольжении</b>								

Для сравнения параметров построим график. Данные берем из таблицы 5.2



По построенному графику видны изменения которые произошли в результате изменения формы паза ротора. Кратность пускового тока выросла при одном и том же скольжении, также как и кратность пускового момента это происходит за счет эффекта вытеснения тока, за счет которого активное сопротивление ротора увеличивается. Расчет асинхронного двигателя с двойной беличьей клеткой позволил повысить пусковой момент примерно на 30%. При этом величина пускового тока находится в допустимых пределах для данного типа двигателя

## Заключение

В выполненной квалификационной работе разработан крановый асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Для заданных номинальной мощности  $P_{2н}=7,5$  кВт, номинальной частоте  $f_1=50$  Гц и напряжении  $U_{нф}=220/380$  В. Определены:

- КПД двигателя  $\eta = 0,83$ ;
- Коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,83$ ;
- Число полюсов  $2p=6$ ;
- Класс изоляции «F»;
- Частота вращения  $n_{ном}=1000$  об/мин;
- Потребляемый ток  $I_n = 16,79$  А.

Определены параметры машины, масса активных материалов. Рассчитаны рабочие и пусковые характеристики.

Суммарный прогиб вала под действием тяжести ротора и силы одностороннего утяжеления не превышает 10% от величины воздушного зазора. Критическая частота вращения намного выше номинальной. В опасных сечениях вал имеет запасы по прочности.

Превышения температуры нагрева статора находятся в допустимых пределах значений для класса нагревостойкости F (до 135°C).

Специальная часть ВКР посвящена разработке ротора с двойной беличьей клеткой. В этой части работы спроектирован ротор, произведен расчет и выбор формы паза, построены характеристики двигателя. За счет изменения формы паза ротора, кратность пускового тока выросла при одном и том же скольжении, так же выросла кратность пускового момента.

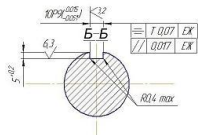
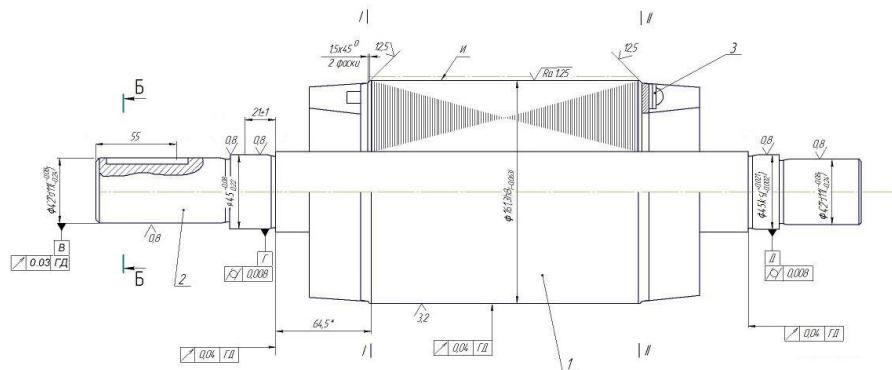
Разработан технологический процесс сборки ротора кранового двигателя, проведен анализ исходных данных, проведена оценка технологичности конструкции. Выполнена схема сборки ротора асинхронного кранового двигателя и его маршрутная карта которая

устанавливает последовательность операций и их содержание. Выбрано производственное оборудование, а также произведен расчет норм времени и количества оборудования. Разработанный технологический процесс соответствует всем нормам и техническому заданию.

Экономическая часть рассматривает вопросы ресурсоэффективности и ресурсосбережения при производстве асинхронного кранового двигателя. Проведена оценка конкурентоспособности из которой видно, что спроектированный двигатель не уступает аналогам.

В части «Социальная ответственность» выполнен анализ вредных и опасных факторов на производстве, имеющих место быть на сборочном участке, проанализированы причины травматизма, а так же выявлены меры по технике безопасности, пожарной безопасности, по охране труда и окружающей среды. Проведен расчет искусственного освещения для участка сборки.

ФЮРА.621313.004.СБ



1 Покрытие наружной поверхности ротора II эпоксидный грунт ГР-28С серого цвета ГОСТ 9181-75 или эпоксидный грунт ЭП-91 желтого цвета ГОСТ 6943-80  
2 Ротор балансируется. Векторы момента инерции устроятся, набравший вес с последующей раскладкой выстроеными части диска. Допустимый остаточный дисбаланс: в процентах коррекции I и II - 1%  
3 Размер для справок.

				ФЮРА.621313.004 СБ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разработ.	Гопилов А.В.				У		1:2
Проб.	Дорожнина Е.С.				Лист	Листов	1
Техн.пр.	Баранов П.Р.				ТТУ ИИЭО Группа 3-7301		
Нач.цеха					Формат А3		
Этпб					Копировали		

ФЮРА.623000.004

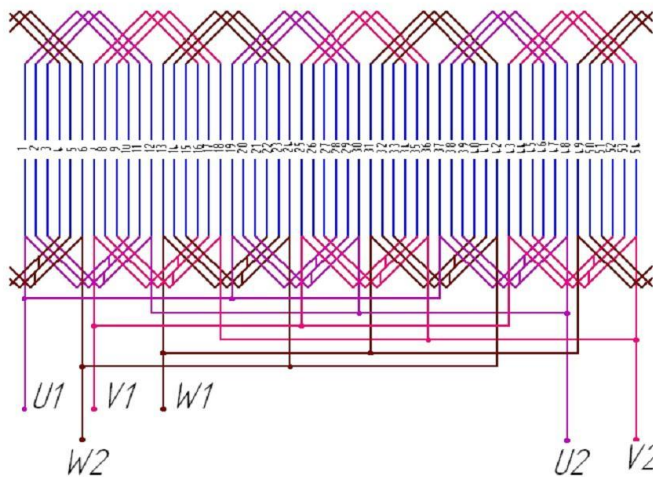
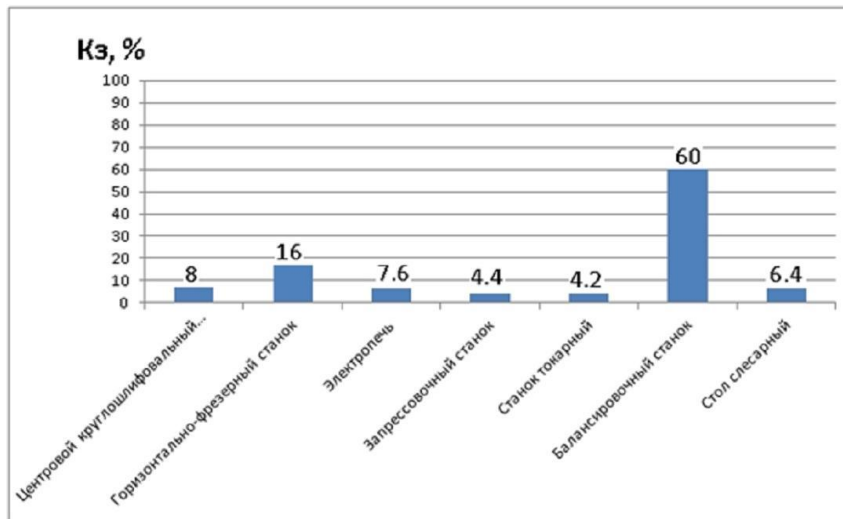


Схема обмотки статора однослойная петлевая

$Z_1=54, m=3, 2p=6, y=9, a_1=3$

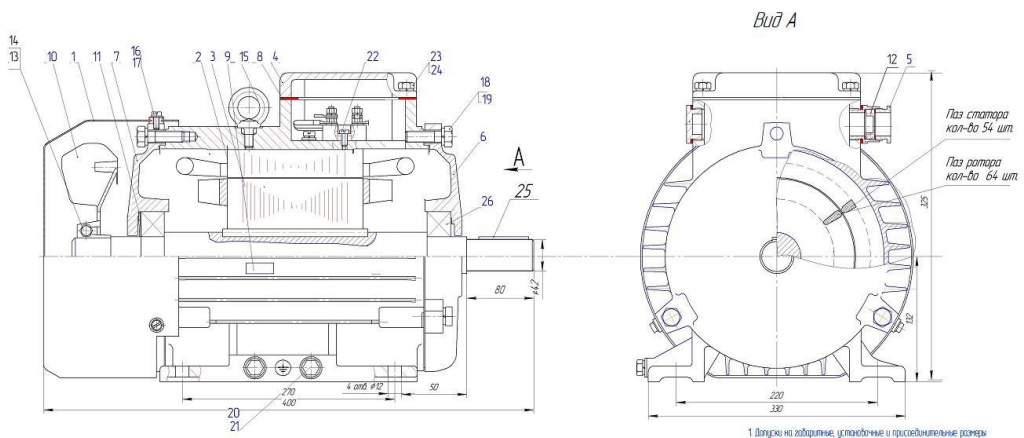
				ФЮРА.623000.004			
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб
Разработ.	Гопилов А.В.				У		1:1
Проб.	Дорожнина Е.С.				Лист	Листов	1
Техн.пр.					ТТУ ИИЭО Группа 3-7301		
Нач.цеха					Формат А3		
Этпб					Копировали		

ФЮРА.623000.004



ФЮРА.623000.004				Лист	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	1:1	
Разработчик	Готлибов А.В.				Лист	
Проектировщик	Дорожнина Е.С.				Листов 1	
Инженер					ТТУ ИнЭО	
Эксперт					Группа 3-7301	
Копировал						Формат А3

ФЮРА.621300.004 СБ

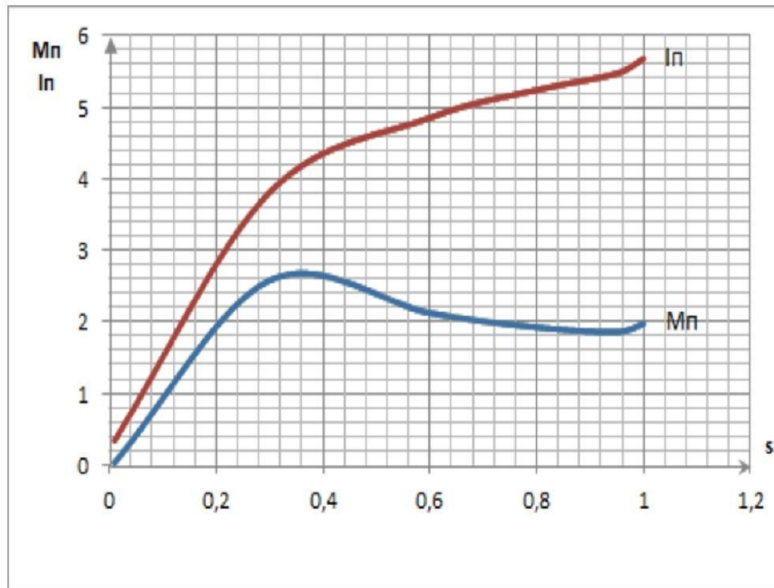


1. Проверка на соответствие установленным и присоединительным размерам по ГОСТ 8592-79.
2. При сборке двигателя шпильки кривошипа шпильки подшипниковые паз. 7, 8 и колесо покрывать паз. 12 покрытие стальной ШВАРМ-221 ГОСТ 1943-80 в количестве 0, 100 кг на двигатель.
3. Подшипники паз. 26 перед сборкой обезжирить.
4. Покрытия двигателя и ротора эпоксидным защитным лаком ХВЭП ГОСТ 9195-75.
5. Элементы устройства и площадки под них, обработанные лакокрасочными материалами не покрывать.
6. Голубые вытопы паз. 22 покрыть эмалью ГФ-92-ЖС красно-коричневой ГОСТ 9195-75.
7. Колеса вытопы обмотки статора присоединить к колодке контактной системы термореле.
8. Консервация двигателя проводить с использованием смазки ВМГ ГОСТ 10503-71.

ФЮРА.621300.004 СБ				Лист	Масса	Масштаб
Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	1:2	
Разработчик	Готлибов А.В.				Лист	
Проектировщик	Дорожнина Е.С.				Листов 1	
Инженер	Баранов П.Р.				ТТУ ИнЭО	
Эксперт					Группа 3-7301	
Копировал						Формат А3

ΦЮРА.623000.004

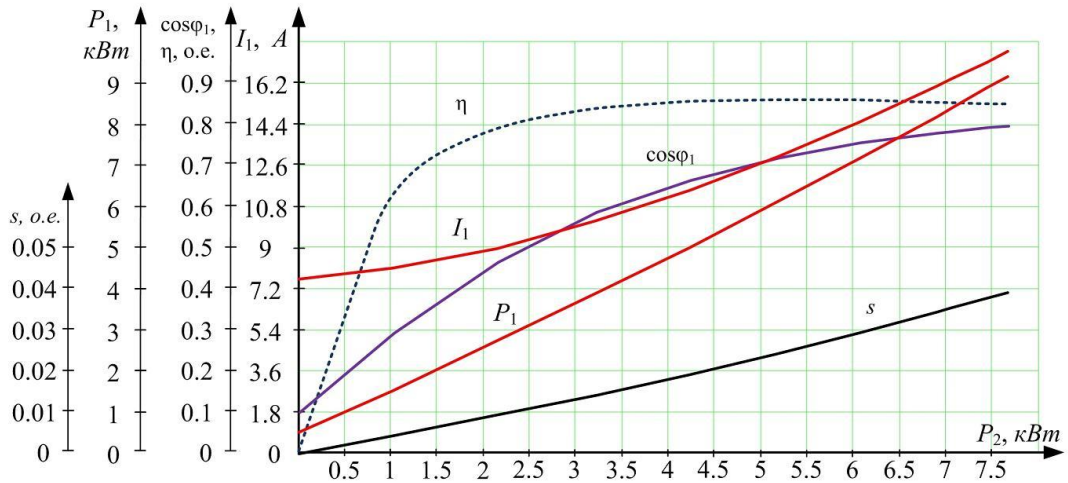
Лист 15  
 Стр. 15  
 Изм. № 1  
 Дата 15.08.2015  
 Проект 15.08.2015  
 Проверка 15.08.2015  
 Конструктор 15.08.2015



ΦЮРА.623000.004				Лист	Масштаб
Пусковые характеристики двигателя				15	
Изм.	Лист	№ докум.	Дата	Лист	Листов
				1	1
Разработ	Гопилов А.В.			ТТЧ ИИЭО	
Проб.	Дорожнина Е.С.			Группа 3-7301	
Техническая служба				Формат А3	

ΦЮРА.623000.004

Лист 15  
 Стр. 15  
 Изм. № 1  
 Дата 15.08.2015  
 Проект 15.08.2015  
 Проверка 15.08.2015  
 Конструктор 15.08.2015



ΦЮРА.623000.004				Лист	Масштаб
Рабочие характеристики двигателя				15	
Изм.	Лист	№ докум.	Дата	Лист	Листов
				1	1
Разработ	Гопилов А.В.			ТТЧ ИИЭО	
Проб.	Дорожнина Е.С.			Группа 3-7301	
Техническая служба				Формат А3	