

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**  
**Некоммерческое акционерное общество**  
**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ им.**  
**ГУМАРБЕКА ДАУКЕЕВА**

Кафедра «Электрических машин и электропривода»

**«Допущен к защите»**

**Заведующий кафедрой**

Оржанова Ж.К к.т.н., профессор

(Ф.И.О., ученая степень, звание)

\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

(подпись)

**ДИПЛОМНАЯ РАБОТА**

На тему: Проектирование отрезка серии асинхронных двигателей

Выполнил (а) Садык А.Т. гр. ЭЭ(ЭАТК)-16-7

(Фамилия и инициалы студента)

группа

специальность 5В071800 - Электроэнергетика

Научный руководитель Шидерова Р. М. проф., к.т.н.

амилия и инициалы, ученая степень, звание)

\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

(подпись)

Рецензент: Шыныбай Ж. С. доктор PhD

(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

(подпись)

**Консультанты:**

**по экономической части:**

доцент Тузелбаев Б.И.

(Фамилия и инициалы, ученая степень, звание)

\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

(подпись)

**по безопасности жизнедеятельности:**

доцент Мананбаева С.Е.

\_\_\_\_\_ « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

(подпись)

**Алматы 2020 г.**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ  
КАЗАХСТАН**  
Некоммерческое акционерное общество  
**АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ**  
**им. ГУМАРБЕКА ДАУЖЕЕВА**

Институт ИЭЭЭТ  
Специальность 5В071800 - Электроэнергетика  
Кафедра «Электрических машин и электропривода»

**ЗАДАНИЕ**

на выполнение дипломной работы

Студент Садық Асқар Талғатұлы  
(фамилия, имя, отчество)

Тема работы «Проектирование отрезка серии асинхронных двигателей»

утверждена приказом ректора № 147 от «11» ноября 2019 г.

Срок сдачи законченной работы «28» мая 2020 г.

Исходные данные, требуемые параметры результатов и исходные данные:

Спроектировать серию трехфазных асинхронных электродвигателей мощностью от 10-20 кВт, с различной частотой вращения поля, напряжением 220/380В при частоте 50 Гц; ротор – короткозамкнутый, исполнение двигателя по степени защиты IP44.

Краткое содержание:

1. Проектирование отрезка серии асинхронных двигателей от 10 до 20 кВт.
2. Произведены электромагнитные расчеты ряда асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором.
3. Выбор и расчет обмоток статора и ротора.
4. Расчет и построение рабочих и пусковых характеристик
5. Упрощенные тепловые и вентиляционные расчёты.
6. Экономическая часть.
7. Безопасность жизнедеятельности.

1. Анализ пожарной опасности электродвигателей.
2. Расчетная часть.
3. Расчет количества модуля порошкового пожаротушения

Рекомендуемая основная литература:

1. Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов «Проектирование серий электрических машин», 2013.
2. Копылов И.П. Проектирование электрических машин.- М. Юрайт, 2015г.
3. Кноринг Г.М. и др., Справочная книга для проектирования электрического освещения, Л., «Энергия», 2015.
4. Гольдберг О.Д. и др., Проектирование электрических машин, М: МГОУ, 2001.
5. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свириденко И.С., Проектирование электрических машин, М.: Высшая школа, 2001.

Консультанты по работе с указанием относящихся к ним разделов

Раздел	Консультант	Сроки	Подпись
Основная часть	Шидерова Р.М.	15.11-1.06	
Экономическая часть	Тузелбаев Б.И.	30.03-28.05	
Безопасность жизнедеятельности	Мананбаева С.Е.	17.02-10.05	

## Г Р А Ф И К

### подготовки дипломной работы

п/п	Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления руководителю	Примечание
1	Сбор данных проектирования отрезка серии асинхронных двигателей	5.02.2020	
2	Данные по объекту проектирования	16.02.2020	
3	Постановка задачи работы	29.02.2020	
4	Электромагнитный расчёт ряда асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, выбор основных размеров.	8.03.2020	
5	Выбор и расчет обмоток статора и ротора	12.03.2020	
6	Упрощённые тепловые и вентиляционные расчёты	24.03.2020	
7	Расчет рабочих и пусковых характеристик	1.04.2020	
8	Расчеты отрезка серии асинхронных двигателей	12.04.2020	
9	Вопросы безопасности и жизнедеятельности	20.04.2020	
10	Экономическая часть	23.04.2020	
11	Оформление пояснительной записки и графического материала	28.05.2020	

Дата выдачи задания « 11 » ноября 2019 г.

Заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ Оржанова Ж.К.  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Руководитель \_\_\_\_\_ Шидерова Р.М.  
(подпись) (Фамилия и инициалы)

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_ Садык А.Т.  
(подпись студента) (Фамилия и инициалы)

## Аннотация

Дипломная работа выполнена на тему проектирование отрезка серии 4А асинхронных двигателей от 10 до 20 кВт.

Произведены электромагнитные расчеты ряда асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором включающие в себя:

- выбор главных размеров;
- выбор и расчет обмоток статора и ротора
- расчет и построение рабочих и пусковых характеристик;
- упрощённые тепловые и вентиляционные расчёты.

Расчеты выполнены в MathCad.

В разделе безопасности жизнедеятельности рассмотрен вопрос о проверке заземляющего устройства и разработке вопросов пожарной безопасности.

В главе “Экономика” было дано технико-экономическое обоснование при выборе асинхронного двигателя, рассчитаны сроки окупаемости.

## **Annotation**

The thesis was carried out on the topic of designing a segment of the 4A series of asynchronous motors from 10 to 20 kW.

Electromagnetic calculations of a number of squirrel-cage induction motors are made including:

- selection of main sizes;
- selection and calculation of stator and rotor windings
- calculation and construction of operational and starting characteristics;
- simplified thermal and ventilation calculations.

The calculations are performed in MathCad.

In the section of Life Safety, the issue of checking the grounding device and the development of fire safety issues is considered.

In the chapter “Economics”, a feasibility study was given when choosing an induction motor, the payback periods were calculated.

## Аңдатпа

Дипломдық жұмыс 10-нан 20 кВ-қа дейінгі 4А сериялы индукциялық қозғалтқыштардың кесіндісін жобалау тақырыбында орындалды.

Бір қатарлы торлы индукциялық қозғалтқыштардың электромагниттік есептеулері мыналарды қамтиды:

- негізгі өлшемдерді таңдау;
- статор және ротор орамаларын таңдау және есептеу
- пайдалану және іске қосу сипаттамаларын есептеу және салу;
- жеңілдетілген жылу және желдету есептеулері.

Есептеулер MathCad жүйесінде орындалады.

Тіршілік қауіпсіздігі бөлімінде жерге қосу құрылғысын тексеру және өрт қауіпсіздігі мәселелерін әзірлеу туралы мәселе қарастырылады.

«Экономика» тарауында индукциялық қозғалтқышты таңдау кезінде техникалық-экономикалық негіздеме берілген, өтелу мерзімі есептелген.

## Содержание

Введение	9
1 Общие вопросы проектирования серии электрических машин	11
2 Выбор главных размеров двигателя	13
2.1 Определение числа пазов, витков и сечения провода обмотки статора	15
3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора	18
4 Расчет короткозамкнутого ротора	20
5 Расчет намагничивающего тока	23
6 Параметры рабочего режима	25
7 Расчет потерь	29
8 Расчет рабочих характеристик	31
9 Расчет пусковых характеристик	34
10 Расчеты отрезка серии асинхронных двигателей	43
11 Экономическая часть	51
12 Безопасность жизнедеятельности	62
12.1 Анализ пожарной опасность электродвигателей	63
12.2 Расчетная часть	67
12.3 Выводы и рекомендации	70
Заключение	71



## Введение

В настоящее время электрические машины общего назначения выпускаются в виде серий, охватывающих определенный диапазон мощностей, частот вращения и напряжений. Машины серий обладают общностью конструктивных решений и технологии их изготовления, а также однотипностью применяемых материалов. В пределах серии стремятся к возможно более широкой унификации узлов и деталей машин.

В дипломной работе рассчитан отрезок серии асинхронных машин от 10 до 20 кВт.

При проектировании электрической машины, как будет видно из последующего, приходится учитывать большое количество факторов, от которых зависят ее эксплуатационные свойства, заводская себестоимость и надежность в работе.

Материалы, размеры и формы конструктивных деталей должны быть так выбраны отдельные детали и так объединены, чтобы машина по возможности наилучшим образом соответствовала своему назначению и была наиболее экономичной в работе и изготовлении. В настоящее время выпускается достаточно большое количество серий асинхронных машин малой мощности для различных механизмов для эксплуатации в различных условиях, с разной степенью защиты и предназначенных для различных номинальных режимов работы. Наиболее востребованными являются асинхронные электродвигатели малой мощности серии:

АИМ-М - трехфазные взрывозащищенные с короткозамкнутым ротором предназначены для эксплуатации во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок. Напряжение питающей сети 220 - 660 В. частота 50 Гц. Номинальный режим работы: продолжительный S1. Степень защиты: IP54:

АИМА-М - трехфазные взрывозащищенные электродвигатели с короткозамкнутым ротором предназначены для привода запорной арматуры во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок. Напряжение питающей сети 220-660В, частота 50 Гц. Номинальный режим работы :S3 с ПВ - 25%. Степень защиты:EP54:

АИУ - трехфазные асинхронные взрывозащищенные электродвигатели с короткозамкнутым ротором предназначены для эксплуатации в подземных выработках угольных и сланцевых шахт, а также помещениях и наружных установках, опасных по метану и угольной пыли. Напряжение питающей сети 220-660В, частота 50 Гц. Номинальный режим работы: продолжительный S1. Двигатели допускают работу в режимах S2. S3. S4 и S6. Исполнение по взрывозащите: РВ - ЗВ. Степень защиты:EP54.

АЗО -трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором предназначены для привода машин и механизмов общепромышленного применения. Напряжение питающей сети 220-660В. частота 50 Гц. Номинальный режим работы: продолжительный S1. Двигатели

допускают работу в режимах : S2, S3, S4 и S6. Степень защиты: корпуса и коробки выводов - IP54: кожуха вентиляторов - IP20:

АЗОС - трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором предназначены для привода машин и механизмов общепромышленного применения.

Напряжение питающей сети 220-660В, частота 50 Гц. Номинальный режим работы: продолжительный S1. Двигатели допускают работу в режимах S2, S3, S4 и S6. Степень защиты: корпуса и коробки выводов - IP54: кожухов вентиляторов - IP20;

2ДАВ71-4 -Электродвигатели асинхронные однофазные конденсаторные встраиваемые предназначены для привода активатора бытовых стиральных машин. Номинальный режим работы: S3 - 60%;

АЗОК - Электродвигатели асинхронные однофазные конденсаторные предназначены для привода различных устройств и механизмов машин. Номинальный режим работы: продолжительный S1. Двигатели допускают работу в режимах S2, S3, S4 и S6;

ДАК - Двигатели являются комплектующими для изделий бытового и промышленного назначения (электросоковыжималки, стиральные машины, электроинструмент и т. п.). Двигатели изготавливаются по ТУ 16-05755950-083-93, Номинальный режим работы продолжительный (S1) или повторно-кратковременный (S3).

## 1 Общие вопросы проектирования серии электрических машин

Асинхронные машины используют главным образом в качестве электрических двигателей трехфазного тока. Простота устройства и высокая надежность позволяют применять их в различных отраслях техники для привода станков, грузоподъемных и землеройных машин, компрессоров, вентиляторов и пр. В системах автоматического регулирования широко используют одно- и двухфазные управляемые асинхронные двигатели, асинхронные тахогенераторы, а также сельсины.

Электрические машины, в том числе и асинхронные двигатели, принято разделять по мощности на три группы: большой, средней и малой мощности. В общем случае представители разных групп, кроме мощности, отличаются также конструктивными, функциональными, эксплуатационными и прочими особенностями. Деление на три группы является условным и не имеет четких границ. Асинхронные машины малой мощности работают на переменном токе нормальной или повышенной частоты.

Электрические машины малой мощности представляют собой достаточно широкий класс технических объектов, применяемых в различных областях техники и народного хозяйства, работают при различных условиях эксплуатации и внешних воздействиях. Электрические машины малой мощности относятся к весьма сложным объектам. Каждая из них характеризуется сотнями величин, параметров или характеристик, отражающих энергетические, электрические, магнитные, механические, акустические и прочие свойства. Машины малой мощности отличаются от машин средней и большой мощности не только массовостью производства и применения но, главным образом, существенно большим многообразием выполняемых функций и конструктивных исполнений, особенностями применения и эксплуатации.

В настоящее время электрические машины общего назначения выпускаются в виде серий, охватывающих определенный диапазон мощностей, частот вращения и напряжений. Машины серий обладают общностью конструктивных решений и технологии их изготовления, а также однотипностью применяемых материалов. В пределах серий стремятся к возможно более широкой унификации узлов и деталей машин. При серийном производстве близкие по мощности машины выполняются на одном диаметре якоря и отличаются лишь активной длиной. В современных сериях размером, определяющим габарит машины, является высота оси вращения, т. е. расстояние от оси вращения вала до опорной плоскости двигателя. С этим размером жестко связаны установочные и присоединительные размеры машины. В настоящее время основной серией асинхронных двигателей, выпускаемой промышленностью, является серия АР1. Двигатели малой мощности этой серии изготавливаются на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин. По своим

показателям она превосходит серию 4А: имеет меньшие массогабаритные показатели (на 10 - 15%) и лучшие характеристики. Коэффициент полезного действия и  $\cos\phi$  у машин этой серии 1 - 1.5 % выше, чем у машин серии 4А. При изготовлении машин этой серии применяется механизированная укладка обмоток, что позволяет уменьшить длину лобовых частей на 20% и сократить расход обмоточного провода на 10%. Для обеспечения высокой надежности обмотки все двигатели имеют изоляцию класса нагревостойкости F при расчетном нагреве обмоток, соответствующем классу В.

Асинхронные двигатели малой мощности имеют ряд преимуществ по сравнению с другими типами машин, в частности с коллекторными: 1) простота конструкции и низкая стоимость производства; 2) отсутствие источника радиопомех; 3) малая шумность двигателя; 4) простота и надежность в эксплуатации.

При серийном производстве близкие по мощности машины выполняются на одном диаметре якоря и отличаются лишь активной длиной.

В современных сериях размером, определяющим габарит машины, является высота оси вращения, т. е. расстояние от оси вращения вала до опорной плоскости двигателя. С этим размером жестко связаны установочные и присоединительные размеры машины.

В настоящее время основной серией асинхронных двигателей, выпускаемой промышленностью, является серия АИ. Двигатели малой мощности этой серии изготавливаются на синхронные частоты вращения 3000, 1500, 1000 и 750 об/мин. По своим показателям она превосходит серию 4А: имеет меньшие массогабаритные показатели (на 10 – 15%) и лучшие характеристики.

Коэффициент полезного действия и  $\cos\phi$  у машин этой серии 1 – 1,5% выше, чем у машин серии 4А.

При изготовлении машин этой серии применяется механизированная укладка обмоток, что позволяет уменьшить длину лобовых частей на 20 % и сократить расход обмоточного провода на 10%. Для обеспечения высокой надежности обмотки все двигатели имеют изоляцию класса нагревостойкости F при расчетном нагреве обмоток, соответствующем классу В.

Некоторые справочные данные асинхронных двигателей малой мощности серий 4А и АИ приведены в приложении (табл. П.1 – П.5).

Задание на проектирование асинхронной электрической машины включает в себя четыре главные характеристики и ряд дополнительных характеристик.

К главным характеристикам относятся:

- 1) номинальная мощность электрической машины –  $P_{2н}$ ;
- 2) номинальная частота вращения –  $n_n$ ;
- 3) номинальное напряжение –  $U_{1н}$ .

К дополнительным характеристикам относятся:

- 1) величина коэффициента полезного действия —  $\eta$ ;
- 2) величина коэффициента мощности —  $\cos\phi$ ;
- 3) кратность начального пускового момента, т. е. отношение начального пускового момента к номинальному —  $m_n$ ;
- 4) кратность максимального момента, т. е. отношение максимального момента к номинальному —  $m_k$ ;
- 5) кратность начального пускового тока, т. е. отношение начального пускового тока к номинальному —  $i_n$ ;
- 6) условие окружающей среды — температура, влажность;
- 7) конструктивное исполнение — в зависимости от способа сочленения с другим механизмом;
- 8) иные специальные требования к электрической машине.

В ряде случаев оговариваются только главные характеристики электрической машины и ее конструктивное исполнение и указывается, что остальные требования должны соответствовать требованиям национальных стандартов.

## 2 Выбор главных размеров двигателя

Спроектировать серию трехфазных асинхронных электродвигателей мощностью от 10-20 кВт, с различной частотой вращения поля, напряжением 220/380В при частоте 50 Гц; ротор — короткозамкнутый, исполнение двигателя по степени защиты IP44.

В качестве примера расчета серий асинхронных двигателей. Проектирование трехфазного асинхронного электродвигателя мощностью 19 кВт, с частотой вращения поля 1000 об/мин, напряжением 220/380 В при частоте 50 Гц; ротор — короткозамкнутый, исполнение двигателя по степени защиты IP44. В качестве базовой модели принята конструкция асинхронного двигателя серии 4А.

Число пар полюсов

$$p := 60 \cdot \frac{f_1}{n_1} \quad p = 3,$$

где  $f_1$  - частота напряжения,  $f_1 := 50$  Гц;

$n_1$  - синхронная частота вращения,  $n_1 := 1000$  об/мин.

Высота оси вращения  $h$ , значение наружного диаметра  $D_a$ .

Принимаем для двигателя с  $P_{2н} := 19$  кВт  $h := 180$  мм, соответствующее стандартное значение наружного диаметра  $D_a := 313$  мм.

Внутренний диаметр статора

$$D := D_a \cdot K_D \quad D = 225.36,$$

принимаем  $D := 225$  мм,

где  $K_D$  - отношение диаметров статора, зависящее от числа полюсов  $2p$ : при  $2p = 6$  значение  $K_D$  лежит в пределах  $0.70...0.72$ , выбираем значение  $K_D = 0.72$ .

Полюсное деление

$$\tau := \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad \tau = 117.81 \text{ мм.}$$

Расчетная мощность

$$P' := \frac{P_{2н} \cdot K_e}{\eta \cdot \cos \varphi} \quad P' = 24.023 \text{ кВт},$$

где  $P_{2н}$  - номинальная мощность,  $P_{2н} := 19$  кВт;

$K_e$  - отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению,  $K_e := 0.968$ ;

$\eta$  и  $\cos \varphi$  - КПД и коэффициент мощности двигателя в номинальном режиме, для ближайшего серийного двигателя с  $P = 18,5$  кВт принимаем  $\eta := 0.88$ ,

$\cos \varphi = 0.87$ .

Расчетная длина воздушного зазора

$$l_\delta = \frac{P' \cdot 10^{12}}{D^2 \cdot \Omega_1 \cdot K_v \cdot B_\delta \cdot A \cdot K_{об1}} = \frac{24.023 \cdot 10^{12}}{225^2 \cdot 104.72 \cdot 1.11 \cdot 0.797 \cdot 32.8 \cdot 10^3 \cdot 0.92} = 169.742 \text{ мм},$$

принимаем  $l_\delta = 170$  мм,

где  $\Omega_1 = 2 \cdot \pi \cdot n_1 / 60 = 2 \cdot 3.14 \cdot 1000 / 60 = 104.72 \text{ рад/с}$  - синхронная угловая скорость вращения двигателя;

$K_v$  - коэффициент формы поля, предварительно принимаем  $K_v := 1.11$ ;

$B_\delta$  - индукция в воздушном зазоре, предварительно принимаем  $B_\delta := 0.797$  Тл;

$A$  – линейная нагрузка, предварительно принимаем  $A := 32.8 \cdot 10^3 \text{ A/м}$ ;

$K_{об1}$  – обмоточный коэффициент обмотки статора, зависящий от типа обмотки и параметров.

Для статоров двигателей мощностью 15...110 кВт рекомендуется применять двухслойную всыпную петлевою обмотку из круглого провода, выполняемую распределенной по пазам, с укорочением шага. Для таких обмоток при  $2p = 6$  предварительно принимаем  $K_{об1} := 0.92$ .

При  $l_{\delta} \leq 250 \text{ мм}$  двигатели выполняют без радиальных и аксиальных вентиляционных каналов, при этом сердечники статора и ротора представляют собой пакеты из листовой стали, для которой принимаем  $l_{cm1} = l_{cm2} = l_{\delta}$ .

Критерий правильности выбора главных размеров  $D$  и  $l_{\delta}$

$$\lambda := \frac{l_{\delta}}{\tau} \quad \lambda = 1.443.$$

Данное значение лежит в пределах допустимой зоны для двигателей со степенью защиты IP44.

## 2.1 Определение числа пазов, витков и сечения провода обмотки статора

Возможные числа пазов статора находятся в диапазоне

$$Z_1 = \frac{\pi \cdot D}{t_{1\max}} \dots \frac{\pi \cdot D}{t_{1\min}} = \frac{3.14 \cdot 225}{13} \dots \frac{3.14 \cdot 225}{10.77} = 54.3 \dots 65.6, \quad \text{принимаем}$$
$$Z_1 = 54,$$

где  $t_{1\max}, t_{1\min}$  – предельные значения зубцового деления статора, которые определяются из промежутка  $t_1 = 10.77 \dots 13 \text{ мм}$ ;  $m_1 = 3$  – число фаз статора.

При этом число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / 2 \cdot p \cdot m_1 = 54 / 2 \cdot 3 \cdot 3 = 3. \quad (2.1)$$

Окончательное значение зубцового деления статора

$$t_1 := \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q_1} \quad t_1 = 13.09 \text{ мм} \quad (2.2)$$

Номинальный фазный ток статора

$$I_{1н} := \frac{P_{2н} \cdot 10^3}{m_1 \cdot U_{1н} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} \quad I_{1н} = 37.602 \text{ А}, \quad (2.3)$$

где  $U_{1н}$  - номинальное фазное напряжение обмотки статора,  $U_{1н} := 220 \text{ В}$ .

Число эффективных проводников в пазу

$$u_{н1} := \frac{\pi \cdot D \cdot A \cdot a \cdot 10^{-3}}{I_{1н} \cdot Z_1} \quad u_{н1} = 34.255, \quad (2.4)$$

где  $a$  - число параллельных ветвей фазы. Значение  $a$  определяется из соотношения  $2 \cdot p / a = 2 \Rightarrow a = 3$ .

Окончательные значения величин:

- число эффективных проводников в пазу  $u_{н1} := 34$ ;
- число витков фазы обмотки статора

$$\omega := \frac{u_{н1} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m_1}; \quad \omega = 102; \quad (2.5)$$

- линейная токовая нагрузка

$$A := \frac{2 \cdot I_{1н} \cdot \omega \cdot m_1 \cdot 10^3}{\pi \cdot D} \quad A = 3.256 \cdot 10^4 \text{ А/м} \quad (2.6)$$

Шаг двухслойной обмотки статора

$$y_1 := \beta_1 \cdot \tau_{н1} \quad y_1 = 7.5, \quad (2.7)$$

где  $\beta_1$  - относительный шаг (предварительно принимаем его равным 5/6);

$\tau_{н1} := m_1 \cdot q_1 = Z_1 / 2 \cdot p = 3 \cdot 3 = 9$  - полюсное деление, выраженное числом пазов (зубцов) статора. Округляем  $y_1$  до 8.

Уточняем относительный шаг  $\beta_1 := y_1 / \tau_{н1} \quad \beta_1 = 0.889$ .



Коэффициенты укорочения, распределения и обмоточный

$$K_{об1} := K_{y1} \cdot K_{p1} \quad K_{об1} = 0.945, \quad (2.8)$$

где  $K_{y1} := \sin\left(\frac{\beta_1 \cdot \pi}{2}\right) \quad K_{y1} = 0.985$ , - коэффициент укорочения,

$$K_{p1} := \frac{0.5}{q_1 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{q_1 \cdot 6}\right)} \quad K_{p1} = 0.96$$
, - коэффициент распределения. (2.9)

Используя уточненные значения  $A$  и  $K_{об1}$ , откорректируем значение  $l_\delta$ :

$$l_\delta := \frac{P' \cdot 10^{12}}{D^2 \cdot \Omega_1 \cdot K_\theta \cdot B_\delta \cdot A \cdot K_{об1}} \quad l_\delta = 166.47 \text{ мм},$$

принимая уточненное значение  $l_\delta := 166 \text{ мм}$ . (2.10)

Магнитный поток

$$\Phi := \frac{K_e \cdot U_{1н}}{4 \cdot K_\theta \cdot \omega \cdot f_1 \cdot K_{об1}} \quad \Phi = 9.95 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} \quad (2.11)$$

и окончательное значение индукции в воздушном зазоре

$$B_\delta := \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_\delta} \cdot 10^6 \quad B_\delta = 0.799 \text{ Тл} \quad (2.12)$$

Предварительное значение плотности тока в обмотке статора

$$J_1 := \frac{AJ_1}{A} \cdot 10^{-6} \quad J_1 = 6.096 \text{ А/мм}^2, \text{ где } AJ_1 := 198 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3. \quad (2.13)$$

Сечение эффективного проводника

$$q_{эф} := \frac{I_{1н}}{a \cdot J_1} \quad q_{эф} = 2.056 \text{ мм}^2 \quad (2.14)$$

Принимаем  $n_{эл} := 1$ , а  $q_{эл} := 2.011 \text{ мм}^2$ . По таблице находим диаметр изолированного  $d_{уз} := 1.685 \text{ мм}$  и неизолированного  $d := 1.6 \text{ мм}$  провода. Выбираем круглый медный провод марки ПЭТ-155.

Окончательное значение плотности тока в обмотке статора

$$J_1 := \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} \quad J_1 = 7.08 \text{ А/мм}^2 \quad (2.15)$$

### 3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Предварительные значения ширины зубца

$$b_{z1} := \frac{B_{\delta} \cdot t_1}{B_{z1} \cdot K_c} \quad b_{z1} = 5.992 \text{ мм}; \quad (3.1)$$

и высоты ярма статора

$$h_a := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot B_a \cdot l_{cm1} \cdot K_c} \quad h_a = 20,806 \text{ мм}, \quad (3.2)$$

где  $B_{z1}$  - индукция в зубце статора, принимаем  $B_{z1} := 1.8 \text{ Тл}$ ;  
 $B_a$  - индукция в ярме статора, принимаем  $B_a := 1.45 \text{ Тл}$ ;  
 $K_c$  - коэффициент заполнения пакета сталью,  $K_c := 0.97$ ;  
 $l_{cm1} = l_{\delta}$ .

Паз статора. Размеры паза в штампе:

$$h_{n1} := \frac{D_a - D}{2} - h_a \quad h_{n1} = 23,2 \text{ мм}, \quad (3.3)$$

$$b_{1c} := \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1})}{Z_1} - b_{z1} \quad b_{1c} = 9.8 \text{ мм}, \quad (3.4)$$

$$b_{2c} := \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{u1} - b_{u1}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} \quad b_{2c} = 7.4 \text{ мм}, \quad (3.5)$$

где  $h_{u1}$  - высота паза, при  $h \geq 160 \text{ мм}$   $h_{u1} := 1 \text{ мм}$ ;

$b_{u1}$  - ширина паза, при  $2p \geq 2$   $b_{u1} := 3.7$  мм.

Некоторые размеры заполненного паза:

$$h_{3c} := \frac{b_{2c} - b_{u1}}{2} \quad h_{3c} = 1.95 \text{ мм}; \quad (3.6)$$

$$h_{2c} := h_{ka} - h_{3c} + h_{u34} + 2 \cdot b_{u32} \quad h_{2c} = 1.85 \text{ мм}; \quad (3.7)$$

$$h_{1c} := h_{n1} - (h_{u1} + h_{3c} + h_{2c}) - b_{u32} \quad h_{1c} = 18 \text{ мм}, \quad (3.8)$$

где  $h_{ka} := 2.5$  мм – клин пазовый;  $h_{u34} := 0.5$  мм – прокладка;  $b_{u32} := 0.4$  мм – коробка пазовая.

Основания трапеции, на площади которой размещаются проводники паза:

$$b'_{1c} := \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{n1} - 2 \cdot b_{u32})}{Z_1} - b_{z1} - \Delta b_n - 2 \cdot b_{u32} \quad b'_{1c} = 8.751 \text{ мм}; \quad (3.9)$$

$$b'_{2c} := \frac{\pi \cdot [D + 2 \cdot (h_{u1} + h_{3c} + h_{2c})]}{Z_1} - b_{z1} - \Delta b_n - 2 \cdot b_{u32} \quad b'_{2c} = 6.657 \text{ мм}, \quad (3.10)$$

где  $\Delta b_n = \Delta h_n = 0.2$  мм - величина припусков по высоте и ширине паза.

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки

$$S'_{II} := \frac{b'_{1c} + b'_{2c}}{2} \cdot h_{1c} - S_{np} \quad S'_{II} = 130.97 \text{ мм}^2, \quad (3.11)$$

где значение площади междуслойной прокладки

$$S_{np} := b_{u33} \cdot (b'_{1c} + b'_{2c}) \quad S_{np} = 7.704 \text{ мм}^2; \quad (3.12)$$

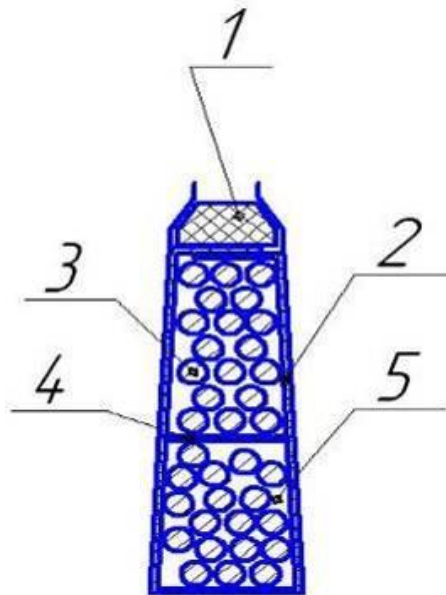
$b_{u33} := 0.5$  мм – ширина прокладки междуслойной.

Коэффициент заполнения паза

$$K_3 := \frac{d_{uz}^2 \cdot u_{n1} \cdot n_{эл}}{S_{II}} \quad K_3 = 0.737 \quad (3.13)$$

Воздушный зазор между статором и ротором для двигателя с внутренним диаметром статора  $D = 225$  мм принимаем  $\delta := 0.45$  мм.

Чтобы показать  $K_3$  наглядно, изобразим паз статора с заполнением на рисунке 3.1.



1 - клин; 2 - пазовая изоляция; 3 - проводник; 4 - межпазовая изоляция; 5 - воздух

Рисунок 3.1 - Паз статора с заполнением

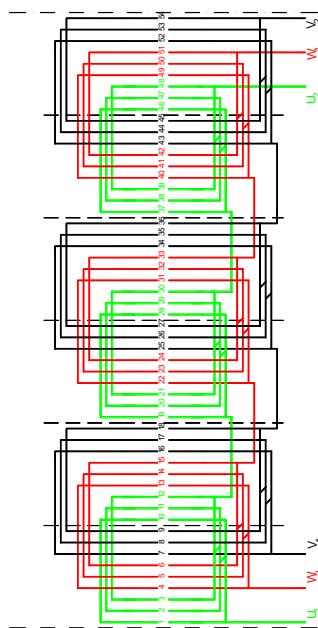


Рисунок 3.2 – Схема трехфазной однослойной обмотки статора

#### 4 Расчет короткозамкнутого ротора

Число пазов ротора:

в двигателях при  $h > 160$  мм пазы ротора выполняют без скоса и обычно принимают  $Z_2 \approx Z_1$ ; при  $2p = 6$  и при  $Z_1 := 54$  принимаем  $Z_2 := 44$ .

Внешний  $D_2$  и внутренний  $D_j$  диаметры сердечника ротора  
 $D_2 := D - 2 \cdot \delta$   $D_2 = 224.1$  мм, (4.1)

$$D_j := 0.23 \cdot D_a \quad D_j = 71.99 \text{ мм}, \text{ принимаем } D_j := 72 \text{ мм}. \quad (4.2)$$

Длина сердечника ротора при  $h \leq 250$  мм принимаем равной

$$l_{cm1} := l_{cm2} = l_\delta \quad l_{cm1} = 166 \text{ мм}. \quad (4.3)$$

Зубцовое деление ротора

$$t_2 := \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} \quad t_2 = 16 \text{ мм}. \quad (4.4)$$

Ток стержня ротора

$$I_2 := Ki \cdot I_{1n} \cdot v_i \quad I_2 = 452.331 \text{ А}, \quad (4.5)$$

где  $Ki = 0.915$  - коэффициент, учитывающий влияние намагничивающего тока и сопротивление обмоток;

$v_i := 2 \cdot m_1 \cdot \omega \cdot K_{o\sigma 1} / Z_2$   $v_i = 13.147$  - коэффициент приведения тока ротора к обмотке статора;

и площадь поперечного сечения стержня статора

$$q'_c := I_2 / J_2 \quad q'_c = 167.53 \text{ мм}^2, \quad (4.6)$$

где  $J_2$  - плотность тока в стержне ротора при коротком замыкании, предварительно принимаем  $J_2 := 2.7$  А/мм<sup>2</sup>.

В двигателях при  $h = 160 \dots 250$  мм выполняют на роторе закрытые грушевидные пазы и зубцы с параллельными гранями. При  $2p = 6$

принимаем размеры шлица  $h_{u2} := 0.7$  мм,  $b_{u2} := 1.5$  мм и высоту перемычки над пазом  $h'_{u2} := 0.3$  мм.

Ширина зубца ротора

$$b_{z2} := \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{B_{z2} \cdot Kc} \quad b_{z2} = 7.24 \text{ мм}, \quad (4.7)$$

где  $B_{z2} = 1.82$  Тл – допустимая индукция в зубце статора.

Основные размеры паза ротора

$$b_{2p} := \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{u2} - 2 \cdot h'_{u2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} \quad b_{2p} = 8 \text{ мм}, \quad (4.8)$$

$$b_{1p} := \sqrt{\frac{b_{2p}^2 \cdot (Z_2/\pi + \pi/2) - 4 \cdot q'_c}{Z_2/\pi - \pi/2}} \quad b_{1p} = 5.1 \text{ мм}, \quad (4.9)$$

$$h_{1p} := \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} \cdot (b_{2p} - b_{1p}) \quad h_{1p} = 20.3 \text{ мм}. \quad (4.10)$$

Окончательные значения сечения стержня

$$q_c := \frac{\pi}{8} \cdot (b_{2p}^2 + b_{1p}^2) + 0.5 \cdot (b_{2p} + b_{1p}) \cdot h_{1p} \quad q_c = 168.312 \text{ мм}^2, \quad (4.11)$$

и окончательное значение плотности тока

$$J_2 := \frac{I_2}{q_c} \quad J_2 = 2.687 \text{ А/мм}^2. \quad (4.12)$$

Полная высота паза и расчетная высота зубца ротора

$$h_{n2} := h_{u2} + h'_{u2} + h_{1p} + 0.5 \cdot (b_{1p} + b_{2p}) \quad h_{n2} = 27.85 \text{ мм}, \quad (4.13)$$

$$h'_{z2} := h_{n2} - 0.1 \cdot b_{1p} \quad h'_{z2} = 27.34 \text{ мм}. \quad (4.14)$$

Ток в короткозамыкающем кольце ротора

$$I_{кл} := \frac{I_2}{\Delta} \quad (4.15)$$

$$I_{кл} = 1064 \text{ A},$$

$$\Delta := 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \quad \Delta = 0.425.$$

где

Короткозамыкающие кольца ротора имеют сечение в виде неправильной трапеции с площадью поперечного сечения

$$q_{кл} := \frac{I_{кл}}{J_{кл}} \quad q_{кл} = 2329 \text{ мм}^2, \quad (4.16)$$

где принимаем  $J_{кл} := 0.457 \text{ А/мм}^2$ .

Средняя высота кольца выбирается из условия:  $b_{кл} \geq 1.2 \cdot h_{н2} \geq 1.2 \cdot 27.85 \geq 33.42 \text{ мм}$ . Расчетное сечение колец литой обмотки ротора принимаем равным  $q_{кл} := a_{кл} \cdot b_{кл}$ , не учитывая утолщения в местах примыкания вентиляционных лопаток, поэтому толщина кольца

$$a_{кл} := \frac{q_{кл}}{b_{кл}} \quad a_{кл} = 68.496 \text{ мм}. \quad (4.17)$$

Средний диаметр короткозамыкающего кольца

$$D_{кл.ср} := D_2 - b_{кл} \quad D_{кл.ср} = 192.1 \text{ мм}. \quad (4.18)$$

## 5 Расчет намагничивающего тока

Окончательные значения индукций:

- в зубцах статора и ротора

$$B_{z1} := \frac{B_\delta \cdot t_1}{b_{z1} \cdot K_c} \quad B_{z1} = 1.8 \text{ Тл}, \quad B_{z2} := \frac{B_\delta \cdot t_2}{b_{z2} \cdot K_c} \quad B_{z2} = 1.82 \text{ Тл}; \quad (5.1)$$

- в ярмах статора и ротора

$$B_a := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot K_c} \quad B_a = 1.485 \text{ Тл}, \quad (5.2)$$

$$B_j := \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 \cdot h'_j \cdot l_{cm2} \cdot Kc} \quad B_j = 0.641 \text{ Тл}, \quad (5.3)$$

где  $h'_j$  - расчетная высота ярма статора,

$$\text{при } 2p = 6 \quad h'_j := \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{n2} \quad h'_j = 48.2 \text{ мм.}$$

Коэффициент воздушного зазора  $K\delta$ , учитывающий влияние неравномерности воздушного зазора из-за наличия пазов на статоре и роторе на магнитную проводимость зазора

$$K\delta := \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta} \quad K\delta = 1.213, \quad (5.4)$$

$$\gamma_1 := \frac{\left(\frac{b_{u1}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{u1}}{\delta}} \quad \gamma_1 = 5.113$$

где

Магнитное напряжение воздушного зазора

$$F_\delta := 1.59 \cdot B_\delta \cdot K\delta \cdot \delta \cdot 10^3 \quad F_\delta = 693.758 \text{ А.} \quad (5.5)$$

Магнитное напряжение зубцовых зон статора и ротора

$$F_{z1} := 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} \cdot 10^{-3} \quad F_{z1} = 70.528 \text{ А,} \quad (5.6)$$

где  $h_{z1} = h_{n1} = 23.2 \text{ мм}$ ,  $H_{z1} := 1520 \text{ А/мм}$ ;

$B_{z2} = 1.82 > 1.8$ , следовательно, необходимо учитывать ответвление части потока в паз. Рассчитаем коэффициент  $k_{nx}$ , показывающий соотношение площадей поперечных сечений паза и зубца,

$$k_{nx} := \frac{b_n}{b_z \cdot Kc} = \frac{0.5 \cdot (b_1 + b_2)}{b_z \cdot Kc} \quad k_{nx} = 0.933 \quad (5.7)$$

$$F_{z2} := 2 \cdot h'_{z2} \cdot H_{z2} \cdot 10^{-3} \quad F_{z2} = 83.66 \text{ А,} \quad (5.8)$$

где  $H_{z2} := 1530 \text{ А/мм}$ .



Коэффициент насыщения зубцовой зоны

$$K_z := 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} \quad K_z = 1.222. \quad (5.9)$$

Длина средней магнитной линии ярм статора и ротора

$$L_a := \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} \quad L_a = 152.992 \text{ мм}, \quad (5.10)$$

$$L_j := \frac{\pi \cdot (D_j + h'_j)}{2 \cdot p} \quad L_j = 62.937 \text{ мм}. \quad (5.11)$$

Магнитное напряжение ярм статора и ротора

$$F_a = L_a \cdot H_a \cdot 10^{-3} \quad F_a = 76.343 \text{ А}, \quad (5.12)$$

$$F_j = L_j \cdot H_j \cdot 10^{-3} \quad F_j = 5.752 \text{ А}, \quad (5.13)$$

где  $H_a := 499 \text{ А/мм}$ , а  $H_j := 91.4 \text{ А/мм}$  - напряженность магнитного поля в ярмах.

Магнитное напряжение на пару полюсов

$$F_u = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j \quad F_u = 930.042 \text{ А}. \quad (5.14)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи

$$K_\mu := \frac{F_u}{F_\delta} \quad K_\mu = 1.341. \quad (5.15)$$

Намагничивающий ток

$$I_\mu := \frac{p \cdot F_u}{2.7 \cdot \omega \cdot K_{\sigma 01}} \quad I_\mu = 10.718 \text{ А}. \quad (5.16)$$

Относительное значение намагничивающего тока

$$I_{\mu^*} := \frac{I_{\mu}}{I_{1H}} \quad I_{\mu^*} = 0.285 \quad (5.17)$$

## 6 Параметры рабочего режима

Средняя ширина катушки

$$b_{км} := \frac{\pi \cdot \beta_1 \cdot (D + h_{n1})}{2 \cdot p} \quad b_{км} = 115.518 \text{ мм}, \quad (6.1)$$

вылет лобовых частей обмотки

$$l_{\text{выл}} := K_{\text{выл}} \cdot b_{км} + B \quad l_{\text{выл}} = 67.759 \text{ мм}, \quad (6.2)$$

длина лобовой части обмотки

$$l_{л1} := K_{л} \cdot b_{км} + 2 \cdot B \quad l_{л1} = 181.725 \text{ мм}, \quad (6.3)$$

где  $B := 10 \text{ мм}$ ;  $K_{л}$ ,  $K_{\text{выл}}$  - коэффициенты, зависящие от числа полюсов и способа изолирования лобовых частей обмотки. При  $h \leq 250 \text{ мм}$  и  $2p = 6$  лобовые части катушки выпянутой обмотки не изолируются; при этом  $K_{л} := 1.4 \text{ мм}$ , а  $K_{\text{выл}} := 0.5 \text{ мм}$ ;

Средняя длина витка обмотки

$$l_{\text{ср1}} := 2 \cdot (l_{н1} + l_{л1}) \quad l_{\text{ср1}} = 695.45 \text{ мм}, \quad (6.4)$$

где  $l_{н1} = l_{\text{см1}}$ ,

Длина проводников фазы обмотки статора

$$L_1 := l_{\text{ср1}} \cdot \omega \quad L_1 = 70940 \text{ мм}. \quad (6.5)$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора

$$r_1 := \rho_{115} \cdot \frac{L_1 \cdot 10^3}{a \cdot n_{эл} \cdot q_{эл}} \quad r_1 = 0.287 \text{ Ом}, \quad (6.6)$$

где  $\rho_{115} := 10^{-6}/41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  - удельное сопротивление меди при расчетной температуре  $115^\circ\text{C}$  для изоляции класса F.

Относительное значение активного сопротивления статора

$$r_{1*} := \frac{r_1 \cdot I_{1H}}{U_{1H}} \quad r_{1*} = 0.049. \quad (6.7)$$

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора

$$r_c := \rho_{c115} \cdot \frac{l_c}{q_c} \cdot 10^3 \quad r_c = 4.811 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}, \quad (6.8)$$

где  $\rho_{c115} := \rho_{кв115} = 10^{-6} / 20.5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$  - удельное сопротивление стержня и короткозамыкающего кольца для литой алюминиевой обмотки ротора при расчетной температуре  $115^\circ\text{C}$ ;

$$l_c := l_{cm2} = 166 \text{ мм};$$

$$r_{кв} := \rho_{кв115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кв.ср}}{Z_2 \cdot q_{кв}} \cdot 10^3 \quad r_{кв} = 2.843 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}, \quad (6.9)$$

$$r_2 := r_c + 2 \cdot \frac{r_{кв}}{\Delta^2} \quad r_2 = 5.126 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}. \quad (6.10)$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора

$$r'_2 := r_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (\omega \cdot K_{об1})^2}{Z_2} \quad r'_2 = 0.13 \text{ Ом}. \quad (6.11)$$

Относительное значение активного сопротивления ротора

$$r'_{2*} := r'_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} \quad r'_{2*} = 0.022. \quad (6.12)$$

Коэффициенты магнитной проводимости обмотки статора:

- пазового рассеяния для конфигурации паза

$$\lambda_{n1} := \frac{h_{1c}}{3 \cdot b_{2c}} \cdot K_\beta + \left( \frac{h_{2c}}{b_{2c}} + \frac{3 \cdot h_{3c}}{b_{2c} + 2 \cdot b_{u1}} + \frac{h_{u1}}{b_{u1}} \right) \cdot K'_\beta \quad \lambda_{n1} = 1.593, \quad (6.13)$$

где  $K'_\beta := 0.25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta_1) \quad K'_\beta = 0.917 ;$

$$K_\beta := 0.25 \cdot (1 + 3 \cdot K'_\beta) \quad K_\beta = 0.938 ;$$

- лобового рассеяния

$$\lambda_{\pi 1} := 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_\delta} \cdot (l_{\pi 1} - 0.64 \cdot \beta_1 \cdot \tau) \quad \lambda_{\pi 1} = 0.705; \quad (6.14)$$

- дифференциального рассеяния

$$\lambda_{o1} := \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot K \delta} \cdot \xi \quad \lambda_{o1} = 1.799, \quad (6.15)$$

где  $\xi := 2 \cdot K'_{ck} \cdot K_\beta - K_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2$   $\xi = 0.9$  - определяется для полураскрытых пазов и при отсутствии скоса;  $K'_{ck} := 1.192$  – коэффициент, определяемый по зависимости  $\frac{t_2}{t_1} = \frac{16}{13.09} = 1.222$ .

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки статора

$$X_1 := 15.8 \cdot f_1 \cdot \omega^2 \cdot l_\delta \cdot \frac{10^{-9}}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{\pi 1} + \lambda_{\pi 1} + \lambda_{o1}) \quad X_1 = 0.621 \text{ Ом}; \quad (6.16)$$

Относительное значение сопротивления

$$X_{1*} := X_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} \quad X_{1*} = 0.106 \quad (6.17)$$

Коэффициенты магнитной проводимости короткозамкнутой обмотки ротора:

- пазового рассеяния для формы паза

$$\lambda_{n2} := \left( \frac{h'_{1p}}{3 \cdot b_{2p}} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_{2p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_{2p}} \right) + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} + 1.12 \cdot \frac{h'_{u2}}{I_2} \cdot 10^3 \quad \lambda_{n2} = 2.449, \quad (6.18)$$

где  $h'_{1p} := h_{1p} + 0.4 \cdot b_{1p}$   $h'_{1p} = 22.34 \text{ мм};$

- лобового рассеяния для литой алюминиевой обмотки

-

$$\lambda_{\pi 2} := \frac{2.3 \cdot D_{кл.сп}}{Z_2 \cdot l_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4.7 \cdot D_{кл.сп}}{2 \cdot a_{кл} + b_{кл}} \quad \lambda_{\pi 2} = 0.238; \quad (6.19)$$

- дифференциального рассеяния

-

$$\lambda_{o2} := \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot K\delta} \cdot \xi \quad \lambda_{o2} = 2.415, \quad (6.20)$$

$$\xi := 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Z_2} \right)^2} \quad \xi = 0.989,$$

где

$$\Delta_z = 0.02 \quad - \text{определяется в зависимости от } \frac{b_{u2}}{t_2} = 0.094 \quad \text{и} \quad \frac{b_{u2}}{\delta} = 3.333.$$

Индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора

$$X_2 := 7.9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot (\lambda_{n2} + \lambda_{r2} + \lambda_{o2}) \cdot 10^{-9} \quad X_2 = 3,246 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \quad (6.21)$$

Приведенное индуктивное сопротивление рассеяния ротора

$$X'_2 := X_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (\omega \cdot K_{o61})^2}{Z_2} \quad X'_2 = 0.848 \text{ Ом}, \quad (6.22)$$

Относительное значение

$$X'_{2*} := X'_2 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} \quad X'_{2*} = 0.145. \quad (6.23)$$

## 7 Расчет потерь

Масса ярма статора и зубцов статора и ротора

$$m_a := \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{cm1} \cdot Kc \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} \quad m_a = 23.988 \text{ кг}, \quad (7.1)$$

$$m_{z1} := h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_{cm1} \cdot Kc \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} \quad m_{z1} = 9.428 \text{ кг}, \quad (7.2)$$

$$m_{z2} := h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Z_2 \cdot l_{cm2} \cdot Kc \cdot \gamma_c \cdot 10^{-9} \quad m_{z2} = 11.147 \text{ кг}, \quad (7.3)$$

где  $\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  - удельная масса стали;  $h_{z1} = h_{n1}$ ,  $h_{z2} = h_{n2}$ .

Основные потери в стали статора

$$P_{ст.осн} := P_{1,0/50} \cdot \left( \frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (K_{ga} \cdot B_a^2 \cdot m_a + K_{gz} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) \cdot 10^{-3} \quad (7.4)$$

$$P_{ст.осн} = 0.356 \text{ кВт},$$

где  $\beta = 1.5$  – для стали 2013;  $P_{1,0/50} = 2.55 \text{ Вт/кз}$  – удельные потери для стали 2013 при толщине листов 0,5 мм;  $K_{ga} = 1.6$  и  $K_{gz} = 1.8$  – коэффициенты, учитывающие влияние на потери технологической обработки стали.

Удельные поверхностные потери в коронках зубцов ротора

$$P_{пов2} := 0.5 \cdot K_{o2} \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n}{10^4} \right)^{1.5} \cdot (B_{o2} \cdot t_1)^2 \quad (7.5)$$

$$P_{пов2} = 222.589 \text{ Вт/м}^2,$$

где  $K_{o2} = 1.6$ ;  $n = n_1$ ;

$$B_{o2} := \beta_{o2} \cdot K \delta \cdot B_{\delta}$$

$B_{o2} = 0.36 \text{ Тл}$ , – амплитуда пульсации магнитной

индукции в воздушном зазоре,

$$\beta_{o2} = 0.371 \text{ – определяем по зависимости } \frac{b_{ул1}}{\delta} = 8.222.$$

Поверхностные потери в роторе, возникающие в поверхностном слое коронок зубцов ротора от пульсаций индукции в воздушном зазоре из-за наличия зубцов на статоре

$$P_{пов2} := P_{пов2} \cdot (t_2 - b_{ул2}) \cdot Z_2 \cdot I_{cm2} \cdot 10^{-9} \quad (7.6)$$

$$P_{пов2} = 0.024 \text{ кВт}.$$

Пульсационные потери в зубцах ротора, вызванные пульсацией индукции в зубцах ротора вследствие изменения взаимного расположения зубцов статора и ротора

$$P_{нул2} := 0.11 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{нул2} \right)^2 \cdot m_{z2} \cdot 10^{-3} \quad (7.7)$$

$$P_{нул2} = 0.061 \text{ кВт},$$

$$\text{где } B_{нул2} := \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{z2}$$

$$B_{нул2} = 0.131 \text{ Тл}.$$

Полные потери в стали

$$P_{cm} := P_{cm.очн} + P_{пов2} + P_{нул2} \quad P_{cm} = 0.441 \text{ кВт.} \quad (7.8)$$

Механические потери

$$P_{mex} := Km \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D^4 \cdot 10^{-15} \quad P_{mex} = 0.086 \text{ кВт,} \quad (7.9)$$

где  $Km := 1.3 \cdot (1 - D_a \cdot 10^{-3})$   $Km = 0.893$  при  $2p = 6$ .

Добавочные потери в номинальном режиме

$$P_{доб.н} := 0.005 \cdot \frac{P_{2н}}{\eta} \quad P_{доб.н} = 0.108 \text{ кВт.} \quad (7.10)$$

Расчет режима холостого хода:

активная составляющая тока холостого хода

$$I_{xxa} := \frac{P_{cm} + P_{mex} + P_{элxx}}{m_1 \cdot U_{1н}} \cdot 10^3 \quad I_{xxa} = 0.948 \text{ А,} \quad (7.11)$$

где  $P_{элxx} := 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$   $P_{элxx} = 0.099 \text{ кВт}$  - электрические потери в обмотке статора при холостом ходе;  
полный ток холостого хода

$$I_{xx} := \sqrt{I_{xxa}^2 + I_{\mu}^2} \quad I_{xx} = 10.76 \text{ А;} \quad (7.12)$$

коэффициент мощности

$$\cos \phi_0 := \frac{I_{xxa}}{I_{xx}} \quad \cos \phi_0 = 0.088. \quad (7.13)$$

## 8 Расчет рабочих характеристик

Потери в стали и механические

$$P_{cm} + P_{mex} = 0.527 \text{ кВт.} \quad (8.1)$$

Активная и реактивная составляющие тока синхронного холостого хода

$$I_{oa} := \frac{(P_{cm.очн} + P_{э.лх}) \cdot 10^3}{3 \cdot U_{1н}} \quad ; \quad I_{oa} = 0.689 \quad ; \quad I_{pa} = I_{\mu} = 10.718. \quad (8.2)$$

8.3 Активная и реактивная составляющие сопротивления намагничивающей ветви схемы замещения

$$r_{12} := \frac{P_{cm.очн}}{m_1 \cdot I_{\mu}^2} \cdot 10^3 \quad r_{12} = 1.013 \text{ Ом}, \quad (8.3)$$

$$X_{12} := \frac{U_{1н}}{I_{\mu}} - X_1 \quad X_{12} = 19.904 \text{ Ом}. \quad (8.4)$$

8.4 Постоянные величины

$$C_1 := 1 + \frac{X_1}{X_{12}} \quad C_1 = 1.031, \quad (8.5)$$

$$X := C_1 \cdot X_1 + C_1^2 \cdot X_2' \quad X = 1.542. \quad (8.6)$$

Предварительно принимаем скольжение в номинальном режиме

$$s_n \approx r_{2*}' = 0.022. \quad (8.7)$$

8.6 Номинальные данные спроектированного двигателя

$$R := C_1 \cdot r_1 + C_1^2 \cdot \frac{r_2'}{s_n} \quad R = 6.517 \text{ Ом}, \quad (8.8)$$

$$Z := \sqrt{R^2 + X^2} \quad Z = 6.697 \text{ Ом}, \quad (8.9)$$

$$I_2'' := \frac{U_{1н}}{Z} \quad I'' = 32.849 \text{ А}, \quad (8.10)$$

$$\cos \phi_2' := \frac{R}{Z} \quad \cos \phi_2' = 0.973, \quad (8.11)$$

$$\sin \phi_2' = \frac{X}{Z} \quad \sin \phi_2' = 0.23, \quad (8.12)$$



$$I_{1a} := I_{oa} + I_2'' \cdot \cos \phi_2' \quad I_{1a} = 32.655 \text{ A}, \quad (8.13)$$

$$I_{1p} := I_{op} + I_2'' \cdot \sin \phi_2' \quad I_{1p} = 18.283 \text{ A}, \quad (8.14)$$

$$I_1 := \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} \quad I_1 = 37.425 \text{ A}, \quad (8.15)$$

$$I_2' := I_2'' \cdot C_1 \quad I_2' = 33.874 \text{ A}, \quad (8.16)$$

$$P_{11} := 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3} \quad P_{11} = 21.552 \text{ кВт}, \quad (8.17)$$

$$P_{\text{э1}} := 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3} \quad P_{\text{э1}} = 1.205 \text{ кВт}, \quad (8.18)$$

$$P_{\text{э2}} := 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3} \quad P_{\text{э2}} = 0.447 \text{ кВт}, \quad (8.19)$$

$$P_{\text{дооб}} := P_{\text{дооб.н}} \cdot \left( \frac{I_1}{I_{1н}} \right)^2 \quad P_{\text{дооб}} = 0.107 \text{ кВт}, \quad (8.20)$$

$$\sum P := P_{\text{см}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{дооб}} \quad \sum P = 2.286 \text{ кВт}, \quad (8.21)$$

$$P_2 := P_1 - \sum P \quad P_2 = 19.267 \text{ кВт}, \quad (8.22)$$

$$\eta := 1 - \frac{\sum P}{P_1} \quad \eta = 0.894, \quad (8.23)$$

$$\cos \phi := \frac{I_{1a}}{I_1} \quad \cos \phi = 0.873. \quad (8.24)$$

Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя

$$U_{1н} = 220 \text{ В}; \quad I_{1н} = 37.6 \text{ А}; \quad I_{oa} = 0.689 \text{ А}; \quad I_{op} = 10.718 \text{ А};$$

$$P_{\text{дооб.н}} = 0.108 \text{ кВт};$$

$$P_{\text{см}} + P_{\text{мех}} = 0.527 \text{ кВт}; \quad r_1 = 0.287 \text{ Ом}; \quad X_1 = 0.621 \text{ Ом}; \quad r_2' = 0.13 \text{ Ом};$$

$$X_2' = 0.848 \text{ Ом}; \quad X = 1.542 \text{ Ом}; \quad C_1 = 1.031.$$

№	Расчетная формула	Ед. изм	0.2s <sub>н</sub>	0.4s <sub>н</sub>	0.6s <sub>н</sub>	0.8s <sub>н</sub>	s <sub>н</sub>	1.2s <sub>н</sub>
1	$R = C_1 \cdot r_1 + C_1^2 \cdot r_2' / s$	Ом	31.4	15.85	10.66	8.07	6.517	5.48
2	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	31.44	15.92	10.78	8.22	6.697	5.693
3	$I_2'' = U_{1н} / Z$	А	6.997	13.81	20.42	26.77	32.84	38.64

							9	
4	$\cos \varphi'_2 = R/Z$	-	0.999	0.995	0.99	0.982	0.973	0.963
5	$\sin \varphi'_2 = X/Z$	-	0.049	0.097	0.143	0.188	0.23	0.271
6	$I_{1a} = I_{oa} + I''_2 \cdot \cos \varphi'_2$	A	7.678	14.44	20.89	26.98	32.65	37.87
7	$I_{1p} = I_{op} + I''_2 \cdot \sin \varphi'_2$	A	11.06	12.06	13.64	15.74	18.28	21.19
8	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	A	13.47	18.81	24.95	31.24	37.42	43.41
9	$I'_2 = I''_2 \cdot C_1$	A	7.215	14.25	21.05	27.6	33.87	39.85
10	$P_1 = 3 \cdot U_{1H} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	5.07	9.53	13.79	17.81	21.55	25
11	$P_{\text{эл}1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0.156	0.304	0.536	0.84	1.205	1.621
12	$P_{\text{эл}2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0.02	0.079	0.173	0.297	0.447	0.619
13	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \cdot (I_1/I_{1H})^2$	кВт	0.014	0.027	0.048	0.075	0.107	0.144
14	$\sum P$	кВт	0.717	0.937	1.283	1.738	2.286	2.91
15	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	4.351	8.593	12.51	16.07	19.27	22.1
16	$\eta = 1 - \sum P/P_1$	-	0.859	0.902	0.907	0.902	0.894	0.884
17	$\cos \varphi = I_{1a}/I_1$	-	0.57	0.768	0.837	0.864	0.873	0.873

## 9 Расчет пусковых характеристик

Безразмерная приведенная высота стержня ротора при расчетной температуре 115°

$$\xi := 63.61 \cdot 10^{-3} \cdot h_c \cdot \sqrt{S} \quad \xi = 1.708, \quad (9.1)$$

где  $h_c := h_{n2} - (h_{u2} + h'_{u2})$   $h_c = 26.85 \text{ мм}$  – высота стержня в пазу.

Глубина проникновения тока в стержень

$$h_r := \frac{h_c}{1 + \phi} \quad h_r = 17.63 \text{ мм}, \quad (9.2)$$

где  $\phi = 0.523$ .

Площадь сечения части стержня, ограниченной высотой  $h_r$

$$q_r := \frac{\pi \cdot b_{2p}^2}{8} + \frac{b_{2p} + b_r}{2} \cdot \left( h_r - \frac{b_{2p}}{2} \right) \quad (9.3)$$

где  $q_r = 120.9 \text{ мм}^2$ ,

$$b_r := b_{2p} - \frac{b_{2p} - b_{1p}}{h_{1p}} \cdot \left( h_r - \frac{b_{2p}}{2} \right) \quad b_r = 6.053 \text{ мм.}$$

Отношение площади всего сечения стержня  $q_c$  к площади  $q_r$

$$Kr := \frac{q_c}{q_r} \quad Kr = 1.392. \quad (9.4)$$

Коэффициент увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока

$$K_R := 1 + (Kr - 1) \cdot \frac{r_c}{r_2} \quad K_R = 1.368. \quad (9.5)$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока

$$r'_{2\xi} := K_R \cdot r'_2 \quad r'_{2\xi} = 0.178 \text{ Ом.} \quad (9.6)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора с учетом вытеснения тока

$$\lambda_{n2\xi} := \left( \frac{h'_{1p}}{3 \cdot b_{2p}} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_{2p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_{2p}} \right) \cdot K_g + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} + \frac{1.12 \cdot h'_{u2}}{I_2} \cdot 10^3 \quad \lambda_{n2\xi} = 1.619, \quad (9.7)$$

где  $K_g := 0.838$ ,

$$I_2 := v_i \cdot I'_{2(1)} \quad I_2 = 2966 \text{ А;} \quad (9.8)$$

$$I'_{2(1)} := I_{П*} \cdot I_{1H} \quad I'_{2(1)} = 225.61 \text{ А.} \quad (9.9)$$

Коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока

$$Kx := \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2}} \quad Kx = 0.837. \quad (9.10)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения тока

$$X'_{2\xi} := Kx \cdot X'_2 \quad X'_{2\xi} = 0.71 \text{ Ом}. \quad (9.11)$$

Ток ротора без учета влияния насыщения коронок зубцов полями пазового рассеяния

$$I'_{2(2)} := \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_{2\xi})^2}} \quad I'_{2(2)} = 156.038 \text{ А}. \quad (9.12)$$

Предполагаемую кратность увеличения тока, обусловленную уменьшением индуктивных сопротивлений из-за насыщения зубцовых зон принимаем равной  $K_{нас} := 1.33$ .

Предварительное значение тока фазы статора с учетом насыщения

$$I_{1нас} := K_{нас} \cdot I'_{2(2)} \quad I_{1нас} = 207.531 \text{ А}. \quad (9.13)$$

Средняя м.д.с. обмотки статора, отнесенная к одному пазу

$$F_{нсп} := \frac{0.7 \cdot I_{1нас} \cdot u_{n1}}{a} \cdot \left( K'_\beta + K_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad F_{нсп} = 3390 \text{ А}. \quad (9.14)$$

Фиктивная индукция магнитного поля рассеивания в воздушном зазоре

$$B_{\phi\delta} := \frac{F_{нсп} \cdot 10^{-3}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \quad B_{\phi\delta} = 4.951 \text{ Тл}, \quad (9.15)$$

где  $C_N := 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} \quad C_N = 0.951.$

Коэффициент  $\chi_\delta$  равный отношению потока рассеивания при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины

$$\chi_\delta = 0.5.$$

Дополнительное раскрытие пазов статора и ротора, учитывающее уменьшение потока пазового рассеивания из-за насыщения

$$C_1 := (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - \chi_\delta) \quad C_1 = 4.695 \text{ мм}, \quad (9.16)$$

$$C_2 := (t_2 - b_{u2}) \cdot (1 - \chi_\delta) \quad C_2 = 7.25 \text{ мм}. \quad (9.17)$$

Уменьшение коэффициента магнитной проводимости пазового рассеивания статора и ротора

$$\Delta\lambda_{n1нас} := \frac{h_{u1} + 0.58 \cdot h_{3c}}{b_{u1}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + 1.5 \cdot b_{u1}} \quad \Delta\lambda_{n1нас} = 0.257, \quad (9.18)$$

$$\Delta\lambda_{n2нас} := \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{C_2}{C_2 + b_{u2}} \Delta \quad \lambda_{n2нас} = 0.387. \quad (9.19)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора и ротора при насыщении зубцов

$$\lambda_{n1нас} := \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} \quad \lambda_{n1нас} = 1.336, \quad (9.20)$$

$$\lambda_{n2\xiнас} := \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2нас} \quad \lambda_{n2\xiнас} = 1.232. \quad (9.21)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора и ротора при насыщении зубцов

$$\lambda_{\delta1нас} := \lambda_{\delta1} \cdot \chi_\delta \quad \lambda_{\delta1нас} = 0.899, \quad (9.22)$$

$$\lambda_{\delta2нас} := \lambda_{\delta2} \cdot \chi_\delta \quad \lambda_{\delta2нас} = 1.208. \quad (9.23)$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учётом насыщения и обмотки ротора с учётом влияния насыщения и вытеснения тока

$$X_{1нас} := X_1 \cdot \frac{\lambda_{n1нас} + \lambda_{\delta1нас} + \lambda_{\lambda1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{\delta1} + \lambda_{\lambda1}} \quad X_{1нас} = 0.446 \text{ Ом}, \quad (9.24)$$

$$X'_{2\xiнас} := X'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xiнас} + \lambda_{\delta2нас} + \lambda_{\lambda2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{\delta2} + \lambda_{\lambda2}} \quad X'_{2\xiнас} = 0.445 \text{ Ом}. \quad (9.25)$$

Коэффициент связи параметров Г-образной и Т-образной схем замещения

$$C_{1П} := 1 + \frac{X_{1нас}}{X_{12П}} \quad C_{1П} = 1.017, \quad (9.26)$$

где  $X_{12П} := X_{12} \cdot \frac{F_u}{F_\delta}$   $X_{12П} = 26.684 \text{ Ом}$  – сопротивление взаимной индукции обмоток.

Расчетные активное и индуктивное сопротивления

$$a_n = r_1 + C_{1П} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{S} = 0.287 + 1.017 \cdot \frac{0.178}{1} = 0.468 \text{ Ом}, \quad (9.27)$$

$$b_n := X_{1нас} + C_{1П} \cdot X'_{2\xi нас} \quad b_n = 0.898 \text{ Ом}. \quad (9.28)$$

Ток обмотки ротора, приведенный в обмотке статора

$$I'_2 := \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad I'_2 = 217.239 \text{ А}. \quad (9.29)$$

Ток обмотки статора

$$I := I'_2 \cdot \frac{\sqrt{a_n^2 + (b_n + X_{12П})^2}}{C_{1П} \cdot X_{12П}} \quad I_1 = 220.895 \text{ А}. \quad (9.30)$$

Расхождение полученных значений  $I_1$  и  $I_{1нас}$  и принятых первоначально

$$\Delta I_{2\%} := \frac{|I'_2 - I'_{2(1)}|}{I'_2} \cdot 100 \quad \Delta I_{2\%} = 3.853 \%, \quad (9.31)$$

$$\Delta I_{1\%} := \frac{|I_1 - I_{1нас}|}{I_1} \cdot 100 \quad \Delta I_{1\%} = 6.05 \%. \quad (9.32)$$

Относительные значения тока статора и электромагнитного момента

$$I_{1*} := \frac{I_1}{I_{1н}} \quad I_{1*} = 5.875, \quad (9.33)$$

$$M_* := \left( \frac{I'_2}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_n}{S} \quad M_* = 1.24. \quad (9.34)$$

Расчет пусковых характеристик для критического скольжения

$$S_{кр(1)} := \frac{C_{1кр} \cdot r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (X_{1кр} + C_{1кр} \cdot X'_{2кр})^2}} \quad S_{кр(1)} = 0.108, \quad (9.35)$$

где  $X_{1кр} := \frac{X_1 + X_{1нас}}{2} \quad X_{1кр} = 0.533 \text{ Ом},$

$$C_{1кр} := 1 + \frac{X_{1кр}}{X_{12П}} \quad C_{1кр} = 1.02, \quad (9.36)$$

$$X'_{2кр} := \frac{X'_2 + X'_{2\xiнас}}{2} \quad X'_{2кр} = 0.647 \text{ Ом}. \quad (9.37)$$

Безразмерная приведенная высота стержня ротора при расчетной температуре 115°C

$$\xi := 63.61 \cdot 10^{-3} \cdot h_c \cdot \sqrt{S} \quad \xi = 0.561, \quad (9.38)$$

где  $h_c := h_{n2} - (h_{u2} + h'_{u2}) \quad h_c = 26.85 \text{ мм}$  – высота стержня в пазу.

Глубина проникновения тока в стержень

$$h_r := \frac{h_c}{1 + \phi} \quad h_r = 26.453 \text{ мм}, \quad (9.39)$$

где  $\phi := 0.015$ .

Площадь сечения части стержня, ограниченной высотой  $h_r$

$$h_r > h_{1p} + \frac{b_{2p}}{2}, \text{ следовательно, } q_r = q_c = 168.312 \text{ мм}^2 \quad (9.40)$$

Отношение площади всего сечения стержня  $q_c$  к площади  $q_r$

$$Kr := \frac{q_c}{q_r} \quad Kr = 1. \quad (9.41)$$

Коэффициент увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока

$$K_R := 1 + (Kr - 1) \cdot \frac{r_c}{r_2} \quad K_R = 1. \quad (9.41)$$

Приведенное активное сопротивление обмотки ротора с учетом действия эффекта вытеснения тока

$$r'_{2\xi} := K_R \cdot r'_2 \quad r'_{2\xi} = 0.13 \text{ Ом.} \quad (9.42)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора с учетом вытеснения тока

$$\lambda_{n2\xi} := \left( \frac{h'_{1p}}{3 \cdot b_{2p}} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_{2p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{w2}}{2 \cdot b_{2p}} \right) \cdot K_g + \frac{h_{w2}}{b_{w2}} + \frac{1.12 \cdot h'_{w2}}{I_2} \cdot 10^3 \quad \lambda_{n2\xi} = 1.911, \quad (9.43)$$

где  $K_g := 0.984$ ,

$$I_2 := \nu_i \cdot I'_{2(1)} \quad I_2 = 1501 \text{ А;} \quad (9.44)$$

$$I'_{2(1)} := \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_{кр}^2 + b_{кр}^2}} \quad I'_{2(1)} = 114.147 \text{ А,} \quad (9.45)$$

$$a_{кр} := r_1 + C_{1кр} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{S_{кр(1)}} \quad a_{кр} = 1.514 \text{ Ом,} \quad (9.46)$$

$$b_{кр} := X_{1кр} + C_{1кр} \cdot X'_{2кр} \quad b_{кр} = 1.193 \text{ Ом.} \quad (9.47)$$

Коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока

$$Kx := \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{\tau 2} + \lambda_{\delta 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{\tau 2} + \lambda_{\delta 2}} \quad Kx = 0.894. \quad (9.48)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом вытеснения тока

$$X'_{2\xi} := Kx \cdot X'_2 \quad X'_{2\xi} = 0.759 \text{ Ом.} \quad (9.49)$$

Ток ротора без учета влияния насыщения коронок зубцов полями пазового рассеяния



$$I'_{2(2)} := \frac{U_{1n}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_{2\xi}}{S}\right)^2 + (X_1 + X'_{2\xi})^2}} \quad I'_{2(2)} = 108.351 \text{ A.} \quad (9.50)$$

Предполагаемую кратность увеличения тока, обусловленную уменьшением индуктивных сопротивлений из-за насыщения зубцовых зон принимаем равной  $K_{нас} := 1.13$ .

Предварительное значение тока фазы статора с учетом насыщения

$$I_{1нас} := K_{нас} \cdot I'_{2(2)} \quad I_{1нас} = 122.437 \text{ A.} \quad (9.51)$$

Средняя м.д.с. обмотки статора, отнесенная к одному пазу

$$F_{нсп} := \frac{0.7 \cdot I_{1нас} \cdot u_{n1}}{a} \cdot \left( K'_\beta + K_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) \quad F_{нсп} = 2000 \text{ A} \quad (9.52)$$

Фиктивная индукция магнитного поля рассеивания в воздушном зазоре

$$B_{\phi\delta} := \frac{F_{нсп} \cdot 10^{-3}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} \quad B_{\phi\delta} = 2.921 \text{ Тл,} \quad (9.53)$$

$$C_N := 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} \quad C_N = 0.951.$$

где

Коэффициент  $\chi_\delta$  равный отношению потока рассеивания при насыщении к потоку рассеивания ненасыщенной машины

$$\chi_\delta := 0.7.$$

Дополнительное раскрытие пазов статора и ротора, учитывающее уменьшение потока пазового рассеивания из-за насыщения

$$C_1 := (t_1 - b_{u1}) \cdot (1 - \chi_\delta) \quad C_1 = 2.417 \text{ мм,}$$

$$C_2 := (t_2 - b_{u2}) \cdot (1 - \chi_\delta) \quad C_2 = 4.35 \text{ мм.}$$

Уменьшение коэффициента магнитной проводимости пазового рассеивания статора и ротора

$$\Delta\lambda_{n1нас} := \frac{h_{u1} + 0.58 \cdot h_{3e}}{b_{u1}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + 1.5 \cdot b_{u1}} \quad \Delta\lambda_{n1нас} = 0.189,$$

$$\Delta\lambda_{n2нас} := \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{C_2}{C_2 + b_{u2}} \quad \Delta\lambda_{n2нас} = 0.347.$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния статора и ротора при насыщении зубцов

$$\lambda_{n1нас} := \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} \quad \lambda_{n1нас} = 1.405,$$

$$\lambda_{n2\xiнас} := \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2нас} \quad \lambda_{n2\xiнас} = 1.564.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора и ротора при насыщении зубцов

$$\lambda_{o1нас} := \lambda_{o1} \cdot \mathcal{X}_\delta \quad \lambda_{o1нас} = 1.259,$$

$$\lambda_{o2нас} := \lambda_{o2} \cdot \mathcal{X}_\delta \quad \lambda_{o2нас} = 1.691.$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учётом насыщения и обмотки ротора с учётом влияния насыщения и вытеснения тока

$$X_{1нас} := X_1 \cdot \frac{\lambda_{n1нас} + \lambda_{o1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{n1} + \lambda_{o1} + \lambda_{л1}} \quad X_{1нас} = 0.511 \text{ Ом},$$

$$X'_{2\xiнас} := X'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xiнас} + \lambda_{o2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{л2}} \quad X'_{2\xiнас} = 0.58 \text{ Ом}.$$

Коэффициент связи параметров Г-образной и Т-образной схем замещения

$$C_{1П} := 1 + \frac{X_{1нас}}{X_{12П}} \quad C_{1П} = 1.019,$$

$$X_{12П} := X_{12} \cdot \frac{F_\psi}{F_\delta} \quad X_{12П} = 26.684 \text{ Ом}$$

где  
индукции обмоток.

– сопротивление взаимной

уточняем критическое скольжение

$$S_{кр} := \frac{C_{1П} \cdot r'_{2\xi}}{\sqrt{r_1^2 + (X_{1нас} + C_{1П} \cdot X'_{2\xiнас})^2}} \quad S_{кр} = 0.116.$$

(9.54)

Расчетные активное и индуктивное сопротивления

$$a_n = r_1 + C_{1П} \cdot \frac{r'_{2\xi}}{S_{кр}} = 0.287 + 1.019 \cdot \frac{0.13}{0.116} = 1.426 \text{ Ом}, \quad (9.55)$$

$$b_n := X_{1нас} + C_{1П} \cdot X'_{2\xi нас} \quad b_n = 1.102 \text{ Ом}. \quad (9.56)$$

Ток обмотки ротора, приведенный в обмотке статора

$$I'_2 := \frac{U_{1н}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \quad I'_2 = 122.079 \text{ А}. \quad (9.57)$$

Ток обмотки статора

$$I_1 := I'_2 \cdot \frac{\sqrt{a_n^2 + (b_n + X_{12П})^2}}{C_{1П} \cdot X_{12П}} \quad I_1 = 124.899 \text{ А}. \quad (9.58)$$

полученных значений и принятых первоначально

$$\Delta I_{2\%} := \frac{|I'_2 - I'_{2(1)}|}{I'_2} \cdot 100 \quad \Delta I_{2\%} = 6.498 \%, \quad (9.59)$$

$$\Delta I_{1\%} := \frac{|I_1 - I_{1нас}|}{I_1} \cdot 100 \quad \Delta I_{1\%} = 1.971 \%. \quad (9.60)$$

Относительные значения тока статора и электромагнитного момента

$$I_{1*} := \frac{I_1}{I_{1н}} \quad I_{1*} = 3.322,$$

$$M_* := \left( \frac{I'_2}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{S_H}{S} \quad M_* = 2.463.$$

Таблица 9.1 - Основные размеры сердечников двигателей серий

## 10 Расчеты отрезка серии асинхронных двигателей

На основании расчета двигателя с номинальными данными:

h, мм	D <sub>Н1</sub> макс, мм	Порядковая длина сердечника	D <sub>1</sub> , мм при 2р			P, кВт при 2р		
			2	4	6	2	4	6
180	203	1	170	183	230	14,5	14,5	14,5
180	225	2	183	240	313	19	19	19
180	225	1	170	183	230	20	20	20
180	226	1	197	240	260	18,5	18,5	18,5
180	203	2	183	230	240	12,5	12,5	12,5
160	185	2	170	183	230	15	15	15
160	195	1	170	183	260	13,5	13,5	13,5
160	195	2	183	240	230	10	10	10

$P_n = 10-20$  кВт,  $U_{1Lt} = 220$ ,  $U_{1Ls} = 380$ ,  $n_1 = 1000$ ,  $f_1 = 50$

были проведены расчеты 8 двигателей, результаты которых сведены в

η, мм при 2р			Cos φ при 2р			P <sub>1</sub> , кВА при 2р		
2	4	6	2	4	6	2	4	6
0,905	0,910	0,907	0,87	0,88	0,89	21,6	21,73	21,68
0,870	0,875	0,867	0,88	0,89	0,87	24,01	24,1	24,023
0,815	0,810	0,813	0,88	0,901	0,905	25,27	25,28	25,287
0,801	0,795	0,790	0,81	0,86	0,89	24,93	24,95	24,987
0,854	0,863	0,871	0,87	0,79	0,865	18,58	18,67	18,690
0,859	0,873	0,86	0,872	0,875	0,878	18,84	18,89	18,93
0,902	0,914	0,912	0,91	0,92	0,904	17,05	17,062	17,069
0,804	0,817	0,823	0,829	0,87	0,81	17,2	17,31	17,315

таблицу. Свои данные асинхронных двигателей, Таблица 1

ателей, Таблица 1

№	Параметр	Двигатель №1	Двигатель №2	Двигатель №3	Двигатель №4
1	Полезная мощность, кВт	12,5	15	19	20
2	Число полюсов	2	2	3	3
3	Высота оси вращения	180	160	180	180
4	Внутренний диаметр статора	0,203	0,185	0,225	0,225
5	Полюсное деление	0,16	0,145	0,117	0,118
6	Расчетная мощность, ВА	18 690	18 900	24 023	25 287
7	Электромагнитные нагрузки, А/м	35000	32 000	32 800	34 900
8	Обмоточный коэффициент (предварительно для однослойной обмотки)	0,95	0,95	0,92	0,91

9	Расчетная длина магнитопровода, м	0,16	0,14	0,17	0,18
10	Отношение	0,95	0,97	0,968	0,959
11	Предельные значения $t_{Z1}$ , мм	$t_{Z1max}= 15$ $t_{Z1min}= 13$	$t_{Z1max}= 15$ $t_{Z1min}= 12$	$t_{Z1max}= 16$ $t_{Z1min}= 14$	$t_{Z1max}= 16$ $t_{Z1min}= 14$
12	Число пазов статора	$Z1_{max}= 49$ $Z2_{min}= 43$	$Z1_{max}= 48$ $Z2_{min}= 39$	$Z1_{max}= 54$ $Z2_{min}= 44$	$Z1_{max}= 54$ $Z2_{min}= 46$
13	Принимаем $Z1$	4	4	4	4
14	Зубцовое деление статора (окончательно), м	0,013	0,012	0,011	0,010
15	Число эффективных проводников в пазу	28	13	34	36
16	Окончательные значения число витков в фазе	192	104	195	199
17	Линейная нагрузка, А/м	30310	31500	32560	33670
18	Магнитный поток, Вб	0,00915	0,0097	0,0095	0,0093
19	Индукция в воздушном зазоре, Тл	0,593	0,749	0,797	0,807
20	Плотность тока в обмотке статора, А/мм <sup>2</sup>	$6,103 \times 10^6$	$5,71 \times 10^6$	$6,096 \times 10^6$	$6,597 \times 10^6$
21	Площадь поперечного сечения эффективного проводника, мм <sup>2</sup>	2,75	5,13	2,056	2,046
22	Плотность тока в обмотке статора (окончательно), А/мм <sup>2</sup>	5,943	5,53	7,08	7,015
23	Размер зубцовой зоны статора и воздушного зазора, мм	$b_{Z1}= 5,1$ $h_a= 24$	$b_{Z1}= 4,9$ $h_a= 22,3$	$b_{Z1}= 5,9$ $h_a= 20,8$	$b_{Z1}= 6,3$ $h_a= 21,6$
24	Размеры паза в штампе, мм	$b_1= 12$ $h_1= 20$	$b_1= 7,6$ $h_1= 21,2$	$b_1= 9,8$ $h_1= 23,2$	$b_1= 10,1$ $h_1= 24,3$
25	Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку, мм	$b_1= 10$ $b_2= 8,5$	$b_1= 7,4$ $b_2= 9,8$	$b_1= 8,7$ $b_2= 6,6$	$b_1= 8,9$ $b_2= 6,8$
26	Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки, мм <sup>2</sup>	33,1	131,7	130,9	129,6
27	Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу, мм <sup>2</sup>	14	24	25	27
28	Коэффициент заполнения паза	0,683	0,74	0,737	0,758
29	Воздушный зазор, мм	0,58	0,5	0,45	0,42

30	Число пазов ротора	34	38	44	46
31	Внешний диаметр ротора, м	0,202	0,184	0,224	0,229
32	Длина магнитопровода ротора, м	0,152	0,14	0,166	0,171
33	Зубцовое деление ротора, мм	18,7	15,2	16	17
34	Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал, мм	72	60	63	66
35	Ток в обмотке ротора, А	460	417	452	461
36	Площадь поперечного сечения стержня (предварительно), мм <sup>2</sup>	92	166,8	155,4	165,5
37	Допустимая ширина зубца, мм	7,615	6,5	7,24	7,53
38	Размеры пазы, мм	b <sub>1</sub> = 9,9 b <sub>2</sub> = 9,6 h <sub>1</sub> = 16	b <sub>1</sub> =7,9 b <sub>2</sub> = 4,2 h <sub>1</sub> = 22,4	b <sub>1</sub> =5,1 b <sub>2</sub> = 8 h <sub>1</sub> = 20,3	b <sub>1</sub> =4,9 b <sub>2</sub> = 10 h <sub>1</sub> = 19,9
39	Полная высота паза, мм	11,8	29,5	27,8	28
40	Площадь поперечного сечения стержня, мм <sup>2</sup>	92	167	154	156
41	Плотность тока в стержне, А/м	5	2,5	2,6	2,8
42	Площадь поперечного сечения кольца, мм <sup>2</sup>	295	595	601	605
43	Магнитное напряжение воздушного зазора, А	629,7	726,5	744,3	746,3
44	Магнитное напряжение зубцовой зоны статора, А	52,7	87,8	90,2	91,6
45	Расчетная индукция в зубцах, Тл	1,3	1,91	1,85	1,75
46	Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора, А	15,3	91,1	85,8	89,6
47	Коэффициент насыщения зубцовой зоны	1,24	1,25	1,26	1,31
48	Магнитное напряжение ярма статора, А	78,7	147	150,2	153,2
49	Магнитное напряжение ярма ротора, А	7,3	11,3	13,1	13,6
50	Магнитное напряжение на пару полюсов, А	783,6	1063,7	1107	1109,36
51	Коэффициент насыщения магнитной цепи	1,24	1,46	1,57	1,69
52	Намагничивающий ток, А	3,2	7,91	8,2	8,8

53	Относительное значение	18,9	29,3	30,1	32,2
54	Активное сопротивление обмотки статора, Ом	1,422	0,355	0,433	0,449
55	Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора, Ом	$80,6 \times 10^{-6}$ $28,7 \times 10^{-6}$ $1,2 \times 10^{-6}$	$59 \times 10^{-6}$ $40,9 \times 10^{-6}$ $1 \times 10^{-6}$	$48,1 \times 10^{-6}$ $28 \times 10^{-6}$ $51,2 \times 10^{-6}$	$50,1 \times 10^{-6}$ $31 \times 10^{-6}$ $52,3 \times 10^{-6}$
56	Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	0,118	0,673	0,621	0,622
57	Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом	2,93	2,91	2,449	2,5
58	Потери в стали основные, Вт	279,3	276,4	356	358
59	Поверхностные потерн в роторе, Вт	6,6	17,7	24	26
60	Пульсационные потери в зубцах ротора, Вт	9,1	75,4	61	66
61	Сумма добавочных потерь в стали, Вт	15,7	93,1	108	113
62	Полные потери в стали, Вт	295,1	369,5	441	459
63	Механические потери, Вт	192,8	117	527	536
64	Холостой ход двигателя, А	3,2	7,95	10,7	11,5
65	$R = C_1 \cdot r_1 + C_1^2 \cdot r_2' / s$ , Ом	40,2	39,46	31,4	33,4
66	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ , Ом	40,26	39,49	31,44	33,44
67	$I_2'' = U_{1н} / Z$ , А	5,23	5,57	6,997	7,0017
68	$\cos \varphi_2' = R/Z$	0,978	0,999	0,999	0,999
69	$\sin \varphi_2' = X/Z$	0,045	0,042	0,049	0,052
70	$I_{1а} = I_{оа} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$ , А	5,95	6,08	7,678	7,687
71	$I_{1р} = I_{оп} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$ , А	7,87	8,14	11,06	11,62
72	$I_1 = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{1р}^2}$ , А	9,86	10,16	11,06	11,16
73	$I_2' = I_2'' \cdot C_1$ , А	5,22	5,71	7,215	7,225
74	$P_1 = 3 \cdot U_{1н} \cdot I_{1а} \cdot 10^{-3}$ , кВт	3,98	4,01	5,07	5,18
75	$P_{\text{э1}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$ , кВт	0,108	0,11	0,156	0,167
76	$P_{\text{э2}} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$ , кВт	0,015	0,018	0,02	0,022
77	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \cdot (I_1 / I_{1н})^2$	0,028	0,034	0,014	0,012

	кВт				
78	$\sum P, \text{ кВт}$	0,589	0,652	0,717	0,723
79	$P_2 = P_1 - \sum P, \text{ кВт}$	2,98	3,36	4,351	4,459
80	$\eta = 1 - \sum P/P_1$	0,799	0,838	0,859	0,874
81	$\cos \varphi = I_{1a}/I_1$	0,564	0,598	0,57	0,55

Сводные данные асинхронных двигателей, Таблица 2

№	Параметр	Двигател№5	Двигател№6	Двигател№7	Двигател №8
1	Полезная мощность, кВт	10,0	14,5	13,5	18,5
2	Число полюсов	2	2	3	3
3	Высота оси вращения	160	180	160	180
4	Внутренний диаметр статора	0,195	0,203	0,195	0,227
5	Полюсное деление	0,17	0,16	0,168	0,112
6	Расчетная мощность, ВА	17 350	21 680	17069	24 987
7	Электромагнитные нагрузки, А/м	36800	35 000	36 300	32 800
8	Обмоточный коэффициент (предварительно для однослойной обмотки)	0,96	0,95	0,94	0,92
9	Расчетная длина магнитопровода, м	0,19	0,18	0,15	0,17
10	Отношение	0,997	0,984	0,97	0,969
11	Предельные значения $t_{z1}$ , мм	$t_{z1\max}= 14$ $t_{z1\min}= 12$	$t_{z1\max}= 15$ $t_{z1\min}= 13$	$t_{z1\max}= 14$ $t_{z1\min}= 12$	$t_{z1\max}= 16$ $t_{z1\min}= 14$
12	Число пазов статора	$Z1_{\max}= 48$ $Z2_{\min}= 41$	$Z1_{\max}= 49,2$ $Z2_{\min}= 42,6$	$Z1_{\max}= 50$ $Z2_{\min}= 42$	$Z1_{\max}= 55$ $Z2_{\min}= 46$
13	Принимаем $Z1$	46	48	47	49
14	Зубцовое деление статора (окончательно), м	0,010	0,013	0,015	0,019
15	Число эффективных проводников в пазу	28	29	33	35
16	Окончательные значения число витков в фазе	190	192	194	196
17	Линейная нагрузка, А/м	29510	35 160	34540	36560
18	Магнитный поток, Вб	0,00908	0,0097	0,0091	0,0099
19	Индукция в воздушном зазоре, Тл	0,587	0,749	0,751	0,801
20	Плотность тока в обмотке статора, А/м <sup>2</sup>	$5,103 \times 10^6$	$5,262 \times 10^6$	$6,01 \times 10^6$	$6,297 \times 10^6$
21	Площадь поперечного сечения эффективного проводника, мм <sup>2</sup>	3,75	5,13	3,61	3,056



22	Плотность тока в обмотке статора (окончательно), А/мм <sup>2</sup>	5,943	6,893	6,18	7,08
23	Размер зубцовой зоны статора и воздушного зазора, мм	$b_{z1}= 2,1$ $h_a= 22$	$b_{z1}= 1,6$ $h_a= 21$	$b_{z1}= 2,85$ $h_a= 22$	$b_{z1}= 3,9$ $h_a= 23$
24	Размеры паза в штампе, мм	$b_1= 11$ $h_1= 19$	$b_1= 13$ $h_1= 20$	$b_1= 12$ $h_1= 21$	$b_1= 10$ $h_1= 24$
25	Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку, мм	$b_1= 11$ $b_2= 8,7$	$b_1= 10$ $b_2= 9,2$	$b_1= 11,5$ $b_2= 7,2$	$b_1= 8,5$ $b_2= 6,2$
26	Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки, мм <sup>2</sup>	35,8	36,4	36,1	40,1
27	Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу, мм <sup>2</sup>	16	24	22	28
28	Коэффициент заполнения паза	0,583	0,663	0,674	0,725
29	Воздушный зазор, мм	0,6	0,58	0,59	0,44
30	Число пазов ротора	30	34	42	45
31	Внешний диаметр ротора, м	0,195	0,202	0,204	0,224
32	Длина магнитопровода ротора, м	0,148	0,152	0,158	0,166
33	Зубцовое деление ротора, мм	19,1	18,7	19,3	16
34	Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал, мм	72	60	68	63
35	Ток в обмотке ротора, А	460	417	438	452
36	Площадь поперечного сечения стержня (предварительно), мм <sup>2</sup>	92	166,8	164	155,4
37	Допустимая ширина зубца, мм	5,615	6,5	7,21	7,24
38	Размеры пазы, мм	$b_1= 8,9$ $b_2= 7,6$ $h_1= 16$	$b_1=7,9$ $b_2= 4,2$ $h_1= 22,4$	$b_1=9,1$ $b_2= 8,5$ $h_1= 18,4$	$b_1=5,5$ $b_2= 8,1$ $h_1= 20,8$
39	Полная высота паза, мм	29,8	29,5	29,3	27,8
40	Площадь поперечного сечения стержня, мм <sup>2</sup>	172	167	163	154
41	Плотность тока в стержне, А/м	2,1	2,5	2,8	2,6
42	Площадь поперечного	364	595	587	601

	сечения кольца, мм <sup>2</sup>				
43	Магнитное напряжение воздушного зазора, А	620,5	726,5	735, 2	745,8
44	Магнитное напряжение зубцовой зоны статора, А	50,7	87,8	85,1	90,2
45	Расчетная индукция в зубцах, Тл	1,4	1,91	1,94	1,95
46	Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора, А	25,5	91,1	94,3	95,7
47	Коэффициент насыщения зубцовой зоны	1,23	1,25	1,24	1,26
48	Магнитное напряжение ярма статора, А	139	147	144,8	150,2
49	Магнитное напряжение ярма ротора, А	8,4	11,3	13,2	14,1
50	Магнитное напряжение на пару полюсов, А	783,6	1063,7	1087	1107
51	Коэффициент насыщения магнитной цепи	1,25	1,46	1,42	1,68
52	Намагничивающий ток, А	4,2	7,91	8,1	8,3
53	Относительное значение	19,4	29,3	30,1	30,6
54	Активное сопротивление обмотки статора, Ом	0,676	0,355	0,306	0,306
55	Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора, Ом	$80,3 \times 10^{-6}$ $29,5 \times 10^{-6}$ $1,3 \times 10^{-6}$	$60 \times 10^{-6}$ $42 \times 10^{-6}$ $1,1 \times 10^{-6}$	$44,5 \times 10^{-6}$ $21,2 \times 10^{-6}$ $23,3 \times 10^{-6}$	$47,3 \times 10^{-6}$ $27,5 \times 10^{-6}$ $25,2 \times 10^{-6}$
56	Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора, Ом	0,236	0,688	0,643	0,656
57	Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора, Ом	2,97	2,89	2,32	2,47
58	Потери в стали основные, Вт	265,4	286,6	287,4	290,8
59	Поверхностные потерн в роторе, Вт	7,5	18,5	22,5	25
60	Пульсационные потери в зубцах ротора, Вт	10,2	78,7	54	65
61	Сумма добавочных потерь в стали, Вт	14,2	92,5	96	110
62	Полные потери в стали, Вт	294,1	375,6	328	454
63	Механические потери, Вт	187,5	121	575	592
64	Холостой ход двигателя, А	2,9	7,88	9,12	11,2
65	$R = C_1 \cdot r_1 + C_1^2 \cdot r'_2 / s$ , Ом	44,2	40,46	28,3	35,4

66	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \text{ Ом}$	39,3	38,4	27,6	35,4
67	$I_2'' = U_{1н} / Z, \text{ А}$	4,89	5,2	6,21	6,45
68	$\cos \varphi_2' = R/Z$	0,956	0,987	0,963	0,999
69	$\sin \varphi_2' = X/Z$	0,044	0,043	0,045	0,048
70	$I_{1а} = I_{оа} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2', \text{ А}$	5,87	6,2	6,9	7,7
71	$I_{1р} = I_{ор} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2', \text{ А}$	7,9	8,63	10,8	12,2
72	$I_1 = \sqrt{I_{1а}^2 + I_{1р}^2}, \text{ А}$	8,86	10,2	9,3	11,1
73	$I_2' = I_2'' \cdot C_1, \text{ А}$	4,42	5,78	6,27	7,55
74	$P_1 = 3 \cdot U_{1н} \cdot I_{1а} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$	2,98	3,01	4,72	5,2
75	$P_{\varepsilon 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$	0,112	0,13	0,141	0,164
76	$P_{\varepsilon 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}$	0,014	0,019	0,016	0,021
77	$P_{\text{доб}} = P_{\text{доб.н}} \cdot (I_1 / I_{1н})^2, \text{ кВт}$	0,027	0,035	0,018	0,015
78	$\sum P, \text{ кВт}$	0,551	0,687	0,672	0,712
79	$P_2 = P_1 - \sum P, \text{ кВт}$	2,92	3,05	3,12	4,67
80	$\eta = 1 - \sum P / P_1$	0,758	0,852	0,841	0,861
81	$\cos \varphi = I_{1а} / I_1$	0,554	0,597	0,54	0,58

## Вывод

В данную таблицу были занесены расчеты отрезка серии асинхронных двигателей от 10 до 20 кВт. Расчеты были произведены с помощью программы MathCad. Были рассчитаны двигатели мощностью: 10, 12.5, 13.5, 14.5, 15, 18.5, 19, 20 кВт.

## 11 Экономическая часть

### 11.1 Расчет стоимости материалов

Расчет стоимости материалов оформляется на основании норм расхода сырья на конкретное изделие. Норма расхода умножается на цену ресурса. Расчет оформлен в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Стоимость материалов

Наименование материала	Единицы измерения	Норма расхода на единицу	Цена за единицу, тыс. тенге	Стоимость, тыс. тенге
1	2	3	4	5
Сталь	кг	26	13,0	338,0
Медная проволока	м	85	0,79	67,15
Итого на одно изделие				405,15

Расчет стоимости комплектующих изделий

Стоимость комплектующих изделий определяется на основании количества необходимых для производства комплектующих изделий и их цены. Расчет оформлен в таблице 11.2:

Таблица 11.2 – Стоимость комплектующих изделий

Наименование комплектующих изделий	Единицы измерения	Количество	Цена за единицу, тыс. тенге	Стоимость, тыс. тенге
1	2	3	4	5
Трансформатор	шт	1	315,0	315,0
	шт.	1	43,0	43,0
вентилятор	шт.	1	4,9	4,9
подшипники	шт.	18	1,1	19,8
Итого на одно изделие				382,7

### 11.3 Расчет стоимости тепловой и электроэнергии

При производстве продукции на предприятии используется тепловая и электроэнергия, стоимость которой включается в себестоимость продукции. Стоимость тепловой энергии рассчитывается по формуле:

$$C_{т.э.} = N_{т.э.} \cdot Ц_{т.э.}, \quad (11.1)$$

где,  $N_{т.э.}$  – расход тепловой энергии на производство ед. продукции (единица измерения – гКал.);

$Ц_{т.э.}$  - стоимость тепловой энергии (тенге/гКал.).

$$N_{э.э.} = 0,28 \text{ гКал};$$

$$Ц_{т.э.} = 80570 \text{ тенге за гКал.}$$

$$C_{т.э.} = 0,28 \cdot 80570 = 22559,6 \text{ тенге.}$$

Стоимость электроэнергии рассчитывается по формуле:

$$C_{э.э.} = N_{э.э.} \cdot Ц_{э.э.} \quad (11.2)$$

где,  $N_{э.э.}$  – расход электроэнергии на производство ед. продукции (единица измерения – кВт/час.);

$Ц_{э.э.}$  - стоимость электроэнергии (тенге/кВт/час.).

$$N_{э.э.} = 3,6 \text{ кВт/час};$$

$$Ц_{э.э.} = 20 \text{ тенге за кВт.}$$

$$C_{э.э.} = 3,6 \cdot 20 = 720 \text{ тенге.}$$

В дипломной работе стоимость тепловой и электроэнергии приняты согласно законодательству на дату расчета.

#### 11.4 Расчет полной заработной платы производственных рабочих

Заработная плата производственных рабочих рассчитывается исходя из существующей формы оплаты труда и условий премирования.

При бригадной организации труда зарплата бригаде начисляется по комплексным расценкам за единицу продукции и включается в себестоимость продукции. Расчет комплексной сдельной расценки на единицу продукции производится по технически обоснованным нормам времени на выполнение отдельных работ. Каждая отдельная работа тарифицируется по определенному разряду, которому соответствует часовая тарифная ставка.

При выполнении задания использую часовые тарифные ставки рабочих, действующие на момент проведения расчетов. Для этого рассчитал величины часовых тарифных ставок на основе утвержденной месячной тарифной ставки первого разряда равной 9890 тенге. Полученные результаты оформлены в таблице 2.3:

Комплексная расценка на единицу продукции определяется по формуле:

$$P_k = \sum C_{cti} \cdot T_i \quad (11.3)$$

где,  $C_{cti}$  – часовая тарифная ставка  $i$ -го разряда;

$T_i$  – норма времени на выполнение  $i$ -й работы, час;

$m$  – количество работ, включенных в комплексную расценку.

Таблица 11.3 – Тарифные разряды и часовые тарифные ставки на 2020 г.

Категории и профессии работников	Разряд работы					
	1	2	3	4	5	6
	Тарифные коэффициенты и ставки					
	1,0	1,16	1,35	1,57	1,73	1,90
Токарь	9890					18791
Слесарь	9890				17109,7	
Фрезеровщик	9890					18791
Сверловщик	9890			13351,5		

$$P_k = (1879 \cdot 0,22) + (17109,7 \cdot 0,17) + (18791 \cdot 0,17) + (13351,5 \cdot 0,29) = 13575,02 \text{ тенге.}$$

Величина премии при сдельно-премиальной системе оплаты труда (на единицу продукции) определяется по формуле:

$$P_p = P_k \cdot (K_{пр} / 100), \quad (11.4)$$

где,  $K_{пр}$  - процент премии за выполнение технически обоснованной нормы выработки.

$$P_p = 13575,02 \cdot (14/100) = 1900,50 \text{ тенге.}$$

Общая зарплата на единицу продукции складывается из комплексной расценки и суммы премии:

$$C_{зп} = P_k + P_p, \quad (11.5)$$

$$C_{зп} = 13575,02 + 1900,50 = 15475,52 \text{ тенге.}$$

### 11.5 Расчет расходов по содержанию и эксплуатации оборудования

Амортизационные отчисления рассчитаны по каждому виду оборудования (в соответствии с вариантом) линейным методом. Результаты расчетов представлены в таблице 11.4:

Таблица 11.4 – Амортизационные отчисления по оборудованию

Наименование оборудования	Полная стоимость оборудования, тыс. тенге	Норма амортизации, % в год	Амортизационные отчисления, тыс. тенге
1	2	3	4
Полуавтомат	11400	12	136,8
Токарный	10560	8	844,8
Станок Шлифовальный	9310	20	186,2
Итого по оборудованию			1167,8

Расходы по содержанию и эксплуатации оборудования рассчитываются по формуле:

$$C_{сэо} = (2,5 \cdot A_{об} / 12) / Q_{мес}, \quad (5.6)$$

где,  $A_{об}$  - сумма амортизационных отчислений, определяемых по всем видам оборудования, тенге;

$Q_{мес}$  – объем выпуска продукции за месяц, шт.

$$C_{сэо} = (2,7 \cdot 1167,8 / 12) / 245 = 1,07 \text{ тыс. тенге}$$

### 11.6 Расчет общепроизводственных и общехозяйственных расходов

В смету общепроизводственных (цеховых) расходов включаются расходы на оплату труда работников аппарата управления, амортизация, расходы на содержание и ремонт зданий и сооружений, расходы на охрану труда, а также прочие расходы (канцелярские, телефонные и пр.).

Расходы на оплату труда работников аппарата управления рассчитываются на основании штатного расписания, должностных окладов с учетом принятой на предприятии системы доплат и надбавок, а также премирования за производственные результаты.

Расчет заработной платы выполнены в таблице 11.5:

Таблица 11.5 – Расчет заработной платы цехового персонала

Должность	Количество	Тарифный разряд	Тарифный коэффициент	Должностной оклад тыс. тенге	Премии, тыс. тенге
Начальник цеха	1	15	3,48	904,8	253,34
Сменный мастер	1	10	2,48	644,8	64,48

Продолжение таблицы 11.5

Начальник технич. бюро	1	14	3,25	845	253,5
Инженер	2	11	2,65	689	241,15
МОП	1	4	1,57	408,2	81,64

Должностной оклад рассчитан на основании принятой ставки первого разряда на момент расчета, и равен 260000 тенге.

Расходы на охрану труда ( $P_{от}$ ) равны – 3% от суммы заработной платы цехового персонала. Прочие расходы ( $P_{п}$ ) – 2%.

$$P_{от} = 5078,68 \cdot 0,03 = 152,36 \text{ тыс. тенге,}$$

$$P_{п} = 5078,68 \cdot 0,01 = 50,79 \text{ тыс. тенге.}$$

Амортизационные отчисления по зданию цеха рассчитываются по формуле:

$$A_{ц} = C_{ц} \cdot (H_a / 100) / 12, \quad (11.7)$$

где,  $A_{ц}$  - амортизационные отчисления по зданию цеха, тенге;

$C_{ц}$  – стоимость производственной площади цеха, тенге;

$H_a$  - годовая норма амортизационных отчислений по зданию цеха, %.

Норму амортизационных отчислений по зданию цеха приняты в размере 4%.

$$A_{ц} = 98000 \cdot (4 / 100) / 12 = 326,67 \text{ тыс. тенге.}$$

Расходы на содержание зданий и сооружений ( $P_c$ ) приняты в размере 40% от суммы амортизационных отчислений.

$$P_c = 326,67 \cdot 0,40 = 130,67 \text{ тыс. тенге.}$$

Расходы на ремонт зданий ( $P_p$ ) приняты в размере 5% от амортизационных отчислений.

$$P_p = 326,67 \cdot 0,05 = 16,33 \text{ тыс. тенге;}$$

Общепроизводственные расходы на единицу продукции определяются по следующей формуле:

$$C_{оп} = (Z_{ц} + A_{ц} + P_{от} + P_{п} + P_c + P_p) / Q_{мес}, \quad (11.8)$$



где,  $C_{оп}$  – сумма общепроизводственных расходов на единицу продукции, тенге;

$Z_{ц}$  – зарплата цехового персонала, тенге;

$A_{ц}$  – амортизационные отчисления по зданию цеха, тенге;

$P_{от}$  – расходы на охрану труда, тенге;

$P_{п}$  – прочие расходы, тенге;

$P_{с}$  – расходы на содержание зданий и сооружений, тенге;

$P_{р}$  – расходы на ремонт зданий, тенге.

$$C_{оп} = (7400,38 + 326,67 + 222,01 + 148,01 + 130,67 + 16,33) / 270 = 30,53 \text{ тыс.тенге.}$$

Общехозяйственные (общезаводские) расходы рассчитываются по формуле:

$$C_{ох} = 1,7 \cdot C_{зп}, \quad (11.9)$$

где,  $C_{ох}$  – сумма общехозяйственных расходов, тенге;

$C_{зп}$  – сумма заработной платы производственных рабочих, тенге.

$$C_{ох} = 1,7 \cdot 13857,86 = 23558,36 \text{ тенге.}$$

### **11.7 Смета транспортно-заготовительных расходов**

Сумма транспортно-заготовительных расходов определяется в зависимости от объёма продукции. Рассчитываются транспортно-заготовительные расходы от суммы сырья, материалов и комплектующих изделий по формуле:

$$C_{т} = (C_{м} + C_{к}) * CT_{тз} / 100, \quad (11.10)$$

Где,  $C_{м}$  – стоимость материалов и сырья, тенге;

$C_{к}$  – стоимость комплектующих изделий, тенге;

$CT_{тз}$  – ставка транспортно-заготовительных расходов, %.

$C_{м} = 405,15$  тыс. тенге;

$C_{к} = 382$  тыс. тенге;

$CT_{тз} = 16\%$ .

$$C_{т} = (405,15 + 382) \cdot 16 / 100 = 126,056 \text{ тыс. тенге.}$$

## 11.8 Расчет налогов и отчислений, законодательно включаемых в себестоимость

В соответствии с законодательством Республики Казахстан предприятия и организации уплачивают налоги, которые включаются в себестоимость и цену продукции. К таким налогам относят:

- отчисления в фонд социальной защиты населения (ФСЗН);
- земельный налог;
- экологический налог;
- налог на добавленную стоимость (НДС);
- отчисления в централизованные фонды.

Плательщиками ФСЗН являются все предприятия, организации, и ИП. Объектом расчета взносов являются все виды оплаты труда. Ставки платежей установлены для:

- предприятий, организаций и других нанимателей – 34%;
- работающих граждан – 1% от заработка.

Величина отчислений определяется по формуле:

$$\text{ФСЗН} = \text{ФЗП} \times \text{СТ}_{\text{ФСЗН}} / 100, \quad (11.11)$$

где, ФЗП – фонд заработной платы, тенге;

$\text{СТ}_{\text{ФСЗН}}$  - размер ставки, %

В фонд заработной платы включается зарплата производственных рабочих, а также зарплата цехового персонала. (В дипломной работе фонд оплаты труда рассчитан на единицу продукции).

$$\text{ФЗП} = 15475,52 + 5078680 / 245 = 20792,47 \text{ тенге};$$

$$\text{СТ}_{\text{ФСЗН}} = 35\%;$$

$$\text{ФСЗН} = 20792,47 \cdot 0,35 = 7277,36 \text{ тенге};$$

Каждое предприятие уплачивает обязательный взнос по социальному страхованию работников в размере 1% от суммы начисленной заработной платы.

Рассчитать взнос можно по формуле:

$$\text{Н}_{\text{стр}} = \text{ФЗП} \cdot \text{СТ}_{\text{стр}} / 100, \quad (11.12)$$

$$\text{СТ}_{\text{стр}} = 1\%;$$

$$\text{Н}_{\text{стр}} = 20792,47 \cdot 1 / 100 = 207,93 \text{ тенге}.$$

Объектом налогообложения экологическим налогом ( $H_3$ ) являются объемы добываемых природных ресурсов, переработанная нефть и нефтепродукты, а также выбросы (сбросы) загрязняющих веществ в окружающую среду. Ставки экологического налога утверждаются Советом Министров Республики Казахстан.

В дипломной работе ставку экологического налога приняты в размере 2,4%. Базой расчета экологического налога является стоимость тепловой и электроэнергии.

$$H_3 = (28221,74 + 1953,92) \cdot 2,4 / 100 = 724,22 \text{ тенге.}$$

Налог на добавленную стоимость (НДС) – основной налог, который уплачивают предприятия. Ставка налога составляет 20%. Величину налога можно определить по формуле:

$$\text{НДС} = C_{\text{отп (без НДС)}} \cdot 12/100, \quad (11.13)$$

где,  $C_{\text{отп (без НДС)}}$  - отпускная цена предприятия без НДС, тенге;

$$C_{\text{отп (без НДС)}} = 2305219,4 \text{ тенге.}$$

$$\text{НДС} = 2305219,4 \cdot 12 / 100 = 276626 \text{ тенге;}$$

Сбор в Республиканский фонд поддержки производителей сельскохозяйственной продукции, продовольствия и аграрной науки уплачивается по ставке 2% и рассчитывается по формуле:

$$H_{c/x} = (C_{\text{п}} + \text{П}) \cdot 2 / (100-2), \quad (11.14)$$

где,  $C_{\text{п}}$  – полная себестоимость, тенге;

$\text{П}$  – прибыль, тенге;

$$C_{\text{п}} = 1867037,2 \text{ тенге;}$$

$$\text{П} = 392077,81 \text{ тенге.}$$

$$H_{c/x} = (1867037,2 + 392077,81) \cdot 2 / (100 - 2) = 46104,39 \text{ тенге;}$$

### **11.9 Калькуляция себестоимости производства продукции и расчет отпускной цены единицы продукции**

Расчет себестоимости единицы продукции произведен на основании Методических рекомендаций по прогнозированию, учету и калькулированию себестоимости продукции (товаров, работ, услуг) в промышленных организациях Министерства промышленности Республики Казахстан. На основании себестоимости рассчитывается отпускная цена

единицы продукции, в которую кроме себестоимости включаются прибыль, налоги и обязательные отчисления.

Расчет оформлен в таблице 11.6:

Таблица 11.6 – Калькуляция себестоимости единицы продукции

№	Статья калькуляции	Обозначение	Сумма, тенге
1.	Сырье и материалы	$C_m$	405,15
2.	Покупные комплектующие изделия, полуфабрикаты	$C_k$	382,7
3.	Возвратные отходы (-)	$C_{отх}$	24,309
4.	Топливо и энергия на технологические цели	$C_э$	227794,16
5.	Транспортно-заготовительные расходы.	$C_m$	126,056
6.	Зарплата производственных рабочих, в том числе: 6.1. основная зарплата производственных рабочих 6.2. дополнительная зарплата производственных рабочих	$C_{зн}$ $C_o$ $C_d$	15475,52 13575,02 1900,50
7.	Расходы по содержанию и эксплуатации оборудования	$C_{сэо}$	1,07
8.	Расходы на подготовку и освоение производства	$C_{осв}$	12000
9.	Погашение стоимости инструментов и приспособлений	$C_{ин}$	2800
10.	Общепроизводственные расходы, в том числе: 10.1. расходы по оплате труда	$C_{оп}$	30530 27408,81
11.	Общехозяйственные расходы, в том числе: 11.1. расходы по оплате труда	$C_{ох}$	23558,36 13857,86
12.	Налоги, отчисления в бюджет, в т.ч: 12.1. отчисления в фонд социальной защиты населения (ФСЗН) 12.2. страховые взносы по видам обязательного страхования	$C_n$ $H_{фсзн}$ $H_{стр}$	14856 14443,33 412,67
13.	Экологический налог	$H_э$	724,22
14.	Прочие производственные расходы	$C_{прг}$	2756,23

Продолжение таблицы 5.6

15.	Итого производственная себестоимость	$C_{np}$	1666997,5
16.	Расходы на реализацию	$C_{pe}$	200039,7
17.	Полная себестоимость	$C_n$	1867037,2
18.	Прибыль	$\Pi$	392077,81
19.	Сбор в Республиканский фонд поддержки производителей сельскохозяйственной продукции, продовольствия и аграрной науки	$H_{c/x}$	46104,39
20.	Отпускная цена предприятия без НДС	$C_{отп}$	2305219,4
21.	НДС	$H_{ДС}$	461043,88
22.	Отпускная цена предприятия с НДС	$C$	2766263,2 8

1. Статью «Возвратные отходы» рассчитать в процентах от статьи «Сырье и материалы».

2. Расходы на подготовку и освоение производства для равны 12000 рублей.

3. Расходы по статье «Погашение стоимости инструментов и приспособлений целевого назначения» равны 2800 рублей.

4. «Прочие производственные расходы» приняты на уровне 5% от затрат на заработную плату.

5. Производственная себестоимость рассчитывается как сумма статей 1–14 за минусом возвратных отходов.

6. Расходы по статье «Расходы на реализацию» приняты согласно варианту от производственной себестоимости.

7. Полная себестоимость включает в себя производственную себестоимость и расходы на реализацию.

8. На основании заданного уровня рентабельности (Р) следует рассчитать прибыль на единицу продукции по формуле:

$$\Pi = C_n \cdot P / 100, \quad (11.15)$$

где,  $\Pi$  – прибыль, тенге;

$C_n$  – себестоимость полная, тенге;

$P = 21\%$ .

$$\Pi = 1867037,2 \cdot 21 / 100 = 392077,81 \text{ тенге};$$

9. Сумма полной себестоимости, прибыли и налогов представляет отпускную цену предприятия.

## 12 Безопасность жизнедеятельности

### 12.1 Анализ пожарной опасности электродвигателей

В большинстве асинхронных электродвигателей применяется короткозамкнутый ротор. Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется в виде цилиндрической клетки из медных или алюминиевых стержней, которые без изоляции вставляются в пазы сердечника ротора.

Асинхронные электродвигатели выпускаются отечественной промышленностью в виде единых серий, охватывающих все необходимые мощности и частоты вращения.

В основном выпускаются двигатели для питания от сети с частотой 50Гц.

В результате перегрузки электрических машин, из-за засорения вентиляционных каналов системы охлаждения а также при покрытии теплоизолирующим слоем волокон, пуха и пыли внутренней полости машин возникает их перегрев. В этих случаях машина перегревается равномерно. Кроме того, случается, что в электродвигателях перегреваются только обмотки статора или ротора.

Равномерный перегрев всей обмотки статора происходит, если электродвигатель перегружен или нарушен режим его охлаждения, обмотка статора соединена «треугольником», напряжение на зажимах двигателя ниже нормального, вследствие чего в двигателе при номинальной мощности возникают токи перегрузки.

Перегрев обмотки ротора (якоря) возникает при перегрузке двигателя и нарушении режима его охлаждения, в результате плохого контакта в пайках любых частей обмотки, при слабом контакте или искрении в щеточном аппарате.

Перегрев электрических машин может быть вызван их работой на двух фазах, что является наиболее частой причиной выхода из строя трехфазных асинхронных двигателей.

Потеря одной фазы возможна из-за обрыва проводников, нарушения плотности контактов, повреждения аппаратов (поломки, нарушения регулировки, подгорания контактов в магнитном пускателе), но чаще вследствие перегорания одной из плавких вставок в предохранителях. Установлено, что общее количество электродвигателей, вышедших из строя в результате работы на двух фазах, составляет 35—45 % общего числа повреждений электродвигателей на предприятиях.

Перегрев обмоток электрических машин может вызвать воспламенение изоляции проводов, что нередко приводит к пожару, особенно в тех случаях, когда вблизи электрических машин имеются горючие материалы или на их поверхности находятся отложения волокон и пыли.

Распространенной причиной возникновения пожаров является пробой изоляции обмоток на корпус электрических машин. В процессе эксплуатации электрических машин производственная пыль, попадая на обмотку, может образовывать проводящие мостики, которые вызывают перекрытие или пробой изоляции на корпус. Длительный перегрев электрических машин или работа в условиях повышенных температур окружающей среды делает изоляцию обмоток хрупкой и гигроскопичной, «то также может привести к КЗ и пробоем на корпус машины.

Большие переходные сопротивления у электрических машин наиболее часто возникают в распределительных коробках и местах соединения подводящих проводов с выводными концами статорной обмотки (у асинхронных двигателей). Многие асинхронные электродвигатели не имеют зажимов на корпусе для подключения проводов. Поэтому провода соединяются с концами статорной обмотки обычной скруткой, опрессованием или с помощью болтов.

При эксплуатации электрических машин под действием вибрации, резких колебаний и толчков плотность контактов нарушается. В местах соединения проводов образуются большие переходные сопротивления, вызывающие местные нагревы, которые могут привести к воспламенению изоляции и пожарам.

Переходные сопротивления у электродвигателей нередко вызывают сильные нагревы зажимов на коробке. При длительных нагревах изоляционный материал около зажимов прогорает, вследствие чего при смещении зажимов происходят КЗ, которые также могут быть причиной пожаров и загораний.

Особую пожарную опасность представляют искрение щеток и пригорание контактных колец у электрических машин, так как образующиеся искры могут вызвать загорание горючих материалов. Искрение щеток и пригорание контактных колец происходят по следующим причинам: поставлены щетки других марок по сравнению с указанными в паспорте; щетки плохо притерты или слабо прижаты к контактным кольцам; щетки не могут свободно двигаться в обойме щеткодержателя, что ухудшает контакт между контактными кольцами и щетками контактные кольца имеют неровную поверхность и поэтому вибрируют; контактные кольца и щетки загрязнены или замаслены.

В машинах постоянного тока при неправильном выборе и расположении щеток, при больших нагрузках происходит усиление искрения. Воздух в зоне коллектор; ионизируется, что при определенных условиях ведет к появлению пламени круговой формы.

Причиной пожара может быть также перегрев подшипников электрических машин из-за недостаточной их смазки, перекосов вала и т. п. Чаще всего это наблюдается при использовании в машинах подшипников скольжения. Перегрев подшипников может настолько увеличить силы трения, что ротор электрической машины остановится. При этом

поступающая электрическая энергия в обмотках машин полностью превращается в теплоту, которая может стать источником воспламенения изоляции и других горючих материалов.

Выделяемая изолированными проводниками теплота вызывает повышение температуры. В случае значительных перегрузок проводников и особенно при протекании токов КЗ, температура изоляции возрастает настолько, что материал разлагается с выделением горючих паров и газов, что и бывает обычно причиной возгорания изоляции.

Значительную пожарную опасность представляют коммутационные аппараты открытого типа и открытые плавкие вставки, в которых при отключении тока, а так же при перегорании плавкого предохранителя возникает опасное искрообразование. Поэтому, как правило, рубильники, предохранители и переключатели следует применять закрытого типа.

Учитывая пожарную опасность электроустановок, ПУЭ устанавливают ряд специальных требований к электрооборудованию при установке и монтаже.

В процессе эксплуатации электроустановок необходимо так же соблюдать ряд мер предусмотренных ПТЭ с учётом пожарной безопасности.

Система пожарной безопасности предусматривает следующие меры:

- удаление избыточного тепла, выделяемого двигателями;
- максимально возможное применение негорючих и трудно горючих веществ и материалов;
- ограничение количества горючих веществ и их надлежащее расположение;
- изоляцию горючей среды;
- предотвращение распространения огня за пределы очага;
- применение средств пожаротушения.

## 12.2 Расчетная часть

При наблюдении в течение  $T = 8760$  ч за электрооборудованием одного из пожароопасных цехов были получены следующие исходные данные:

$d_1 = 7340$  ч. - средний интервал времени между появлениями обрыва фазы в рассматриваемой сети, питающей АД;

$d_1 = 5,6 \cdot 10^{-5}$  ч. – среднее время срабатывания защиты при обрыве фазы АД;

$d_2 = 15400$  ч. – средний интервал времени между отказами системы автоматического отключения защитного коммутационного аппарата;

$d_2 = 2160$  ч. – интервал времени между проверками системы отключения защитного коммутационного аппарата;

$d_3 = 520$  ч. – средний интервал времени между появлениями горючей пожароопасной пыли на корпусах АД;



$d_3 = 180$  ч. – интервал времени между проверками наличия горючего материала на корпусах АД.

Определить вероятность пожаров в течение  $t = 8760$  ч. при эксплуатации в цехе АД и сравнить полученный результат с нормируемой ГОСТ 12.1.004-91 величиной  $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$ .

Решение.

Используя исходные данные примера, находим  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ .

$$\lambda_1 = \frac{1}{7340} = 1,36 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ч},$$

$$\lambda_1 = \frac{10^5}{5,6} 1/ч,$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{15400} = 6,49 \cdot 10^{-5} \frac{1}{ч},$$

$$\mu_2 = \frac{1}{2160 - 15400 \cdot (1 - e^{-\frac{2160}{15400}})} = 6,9 \cdot 10^3 \frac{1}{ч},$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{520} = 1,92 \cdot 10^{-3} \frac{1}{ч},$$

$$\mu_3 = \frac{1}{180 - 520 \cdot (1 - e^{-\frac{180}{520}})} = 3,6 \cdot 10^{-2} \frac{1}{ч}.$$

Подставляя полученные данные в системы уравнений для нахождения среднего времени до первого пожара  $\bar{\tau}_1$  и дисперсии времени до первого пожара  $\delta_1^2$ , определим среднее время до первого пожара  $\bar{\tau}_1$  и дисперсию времени  $\delta_1^2$ . Получили, что  $\tau_1 = \delta_1 = 1,56 \cdot 10^7$  ч. Тогда вероятность пожара в цехе от эксплуатации АД определяем по приближенной формуле:

$$Q(8760) = 5,619 \cdot 10^{-4}.$$

Используя систему линейных дифференциальных уравнений, с помощью ЭВМ находим  $P_8(8760) = Q(8760) = 4,42 \cdot 10^{-4}$ . Сравнение полученного результата с нормируемой величиной  $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$  показало, что в данном случае пожарная цеха при эксплуатации не обеспечивается.

Определить вероятность пожаров в течение  $t = 8760$  ч. при эксплуатации в цехе АД и сравнить полученный результат с нормируемой ГОСТ 12.1.004-91 величиной  $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$ .

Решение.

Используя исходные данные примера, находим  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  и  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$ .

$$\lambda_1 = \frac{1}{7340} = 1,36 \cdot 10^{-4} \frac{1}{ч},$$

$$\lambda_1 = \frac{10^5}{5,6} \text{ 1/ч,}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{15400} = 6,49 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ч}},$$

$$\mu_2 = \frac{1}{2160 - 15400 \cdot (1 - e^{-\frac{2160}{15400}})} = 6,9 \cdot 10^3 \frac{1}{\text{ч}},$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{520} = 1,92 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{ч}},$$

$$\mu_3 = \frac{1}{180 - 520 \cdot (1 - e^{-\frac{180}{520}})} = 3,6 \cdot 10^{-2} \frac{1}{\text{ч}}.$$

Подставляя полученные данные в системы уравнений для нахождения среднего времени до первого пожара  $\bar{\tau}_1$  и дисперсии времени до первого пожара  $\delta_1^2$ , определим среднее время до первого пожара  $\bar{\tau}_1$  и дисперсию времени  $\delta_1^2$ . Получили, что  $\tau_1 = \delta_1 = 1,56 \cdot 10^7$  ч. Тогда вероятность пожара в цехе от эксплуатации АД определяем по приближенной формуле:

$$Q(8760) = 5,619 \cdot 10^{-4}.$$

Используя систему линейных дифференциальных уравнений, с помощью ЭВМ находим  $P_8(8760) = Q(8760) = 4,42 \cdot 10^{-4}$ . Сравнение полученного результата с нормируемой величиной  $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$  показало, что в данном случае пожарная цеха при эксплуатации не обеспечивается.

Пример 2. Используя исходные данные примера 1, определить, через какое время  $d_3$  необходимо проверять наличие горючего материала (пыли) на корпусах АД, чтобы вероятность пожаров от их эксплуатации была на уровне ГОСТ 12.1.004-91, т.е.  $Q_0(8760) = 1 \cdot 10^{-6}$ .

Используя систему линейных дифференциальных уравнений и формулу:

$$\mu_j = \frac{1}{d_j - \frac{1}{\lambda_j} \cdot [1 - \exp(-\lambda_j \cdot d_j)]}, \quad (12.1)$$

находим  $d_j = 6,95$  ч.

Следовательно, если проверять наличие горючего материала (пыли) на корпусах АД через каждые 7 часов, то нормируемый уровень пожаробезопасности при эксплуатации АД будет обеспечен.

## Расчет количества модуля порошкового пожаротушения

Для тушения электрооборудования принимается порошковое пожаротушение – способ тушения пожара с помощью огнетушащего вещества в виде мелкозернистой порошковой смеси. Химически огнетушащие порошки представляют собой соли металлов с различными специальными добавками.

Расчеты сил и средств выполняются в следующих случаях:

1. при определении требуемого количества сил и средств на тушение пожара;
2. при оперативно-тактическом изучении объекта;
3. при разработке планов пожаротушения;
4. При подготовке пожарно-тактических занятий;
5. при проведении экспериментальных работ по определению эффективности средств тушения;
6. при процессе исследования пожара для оценки действий РТП подразделений.

1. Площадь тушения имеет постоянное значение у пожаров прямоугольной формы с односторонним или многосторонним развитием. В этом случае возможен только один из вариантов тушения пожара. Т.е. фактическое значение расходов огнетушащего вещества поддерживается в течение всего времени тушения постоянным, так как в противном случае будет нарушено условие локализации пожара.

Определяем  $R_{\text{пок}}$  площади огнетушащего порошком при известном ей площади  $S = 25 \text{ м}^2$  по выражению:

$$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}, \quad (12.2)$$

где,  $S$  - площадь порошка из одного модуля,  $\pi = 3,14$ .

Подставляем численность значение, получим:

$$R = \sqrt{\frac{30}{3,14}} 2,82 \text{ м.}$$

Порошковые огнетушащие составы, которые эффективно тушат пожары классов: А (ТГМ), В (жидкостей), и т.д.

Требуемый расход порошка:

$$Q_{\text{тр}} = S_n \cdot I_{\text{тр}}, \quad (12.3)$$

где,  $I_{\text{тр}}$  - расход порошка  $0,3 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$ .

$Q_{\text{тр}} = 9 \text{ кг}/\text{с}$ .

Количество порошка для тушения пожара:

$$W = S_n \cdot I_{mp} \cdot \tau_p, \quad (12.4)$$

где,  $\tau_p$  - расчетное время тушения, принимается равным 30 с:  
Подставляем численность значение в формулу (3.4), получим:

$$W = 30 \cdot 0,3 \cdot 30 = 225 \text{ кг.}$$

При расстановке модулей надо исключить непокрытые порошком участки. Для этого следует найти размер диагонали между модулями, которая должна быть меньше  $2R$  ( $l < 2R$ ).

Схема расчета расстояния приведена на рисунке 12.1

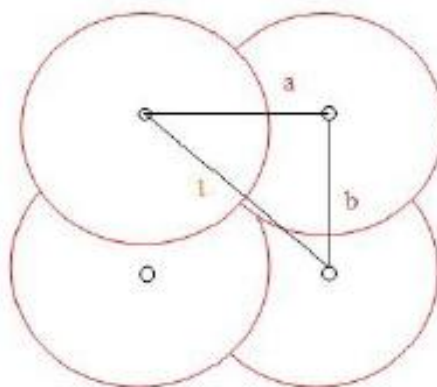


Рисунок 12.1 - Зона распыления порошка

$$l = \sqrt{a^2 + b^2}, \quad (12.5)$$

По формуле (6.5):

$$l = \sqrt{15^2 + 2,82^2} = 3,2 \text{ м}$$

$3,2 < 2 \cdot 2,82$  – условие выполняется.

Общее количество МПП составляет 24 штуки. В каждом ряду по 12 штук.

### Вывод и рекомендации

Анализ показывает, что большинство несчастных случаев происходит по следующим причинам:

- падение пострадавшего в результате ложного шага;
- неудовлетворительная организация производства работ;
- недостатки в организации и проведении подготовки работников по охране труда;

- неудовлетворительное содержание и недостатки в организации рабочих мест;

- неприменение пострадавшими средств индивидуальной защиты.

Рассматривая производственные травмы на предприятиях, можно прийти к заключению, что существует определенная связь между состоянием человеческого организма и несчастным случаем.

Предупреждение производственного травматизма - было и остается комплексной проблемой, требующей усиленного внимания специалистов разного профиля.

Для устранения несчастных случаев я рекомендую проводить следующие мероприятия:

- усилить контроль инженерно-техническим работникам (мастера, прораба, нач. подразделения) за применением СИЗ с работниками предприятия

- оформления наряд допуска на работы с повышенной опасностью;

- ограждения зоны постоянного действия опасных производственных факторов;

- проведение проверки знаний требований ОТ всему составу ИТР;

- тренинги и конкурсы по охране труда;

- ужесточить наказание за невыполнение требований по охране труда;

- поощрение за работу без нарушений и за работу в СИЗ.

## Заключение

В данной дипломной работе было проведено исследование серий асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, более того, были выполнены расчет серий асинхронных машин от 10-20кВт, включая экономическую часть и безопасность жизнедеятельности. При расчете экономической части, был выполнен расчет растрат.

Большое число приводов с повышенным энергопотреблением характеризуется или широким интервалом изменения скорости нагрузки, или наличием интенсивных режимов. В таких приводах широко применяются асинхронные двигатели различных серий. Выбор электрической машины с учетом особенностей режима работы привода способствует решению задачи энергосбережения и повышению надежности всей системы.

Основным преимуществом короткозамкнутых двигателей по сравнению с двигателями единых серий равного габарита (в том числе с повышенным пусковым моментом) является более высокая (в среднем в полтора раза) кратность пускового момента при меньшей (также примерно в полтора раза) кратности пусковых токов.

Энергетические показатели электропривода переменного тока на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в значительной степени определяются характеристиками электрической машины. В настоящее время созданы и успешно применяются большое число конструктивных модификаций двигателей с короткозамкнутым ротором, которые уступают по номинальным энергетическим показателям асинхронным двигателям единых серий основного исполнения, поэтому их применение целесообразно в тех случаях, когда к электрической машине предъявляется ряд дополнительных требований.

Все рассмотренные варианты серий асинхронных машин конструктивной реализации короткозамкнутого ротора позволяют получить в одном габарите в 1,2-2 раза больше пусковой момент при меньшем в 2-3 раза пусковом токе.

Методики расчета, с использованием классических схем электрических цепей, а также численным методом на основе теории цепей, позволяют обеспечить достаточную для инженерных расчетов точность. Это подтверждено экспериментальными исследованиями широкой гаммы двигателей с короткозамкнутым ротором.

## Список литературы

1. Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов «Проектирование серий электрических машин», 2013.
2. Кноринг Г.М. и др., Справочная книга для проектирования электрического освещения, Л., «Энергия», 2015.
3. Копылов И.П., Электрические машины, М.: Логос, 2000.
4. Копылов И.П., Клоков Б.К., Морозкин В.П., Токарев Б.Ф., Проектирование электрических машин, - М.: Высш. шк., 2002.
5. Кацман М.М., Электрические машины, - Высшая школа, 2003.
6. Копылов И.П., Справочник по электрическим машинам. Том 1, М.: Энергоатомиздат.
7. Гольдберг О.Д. и др., Проектирование электрических машин, М: МГОУ, 2001.
8. Вольдек А.И., Попов В.В., Электрические машины. Машины переменного тока, - СПб.: Питер, 2008.
9. Гольдберг О.Д, Гурин Я.С, Свириденко И.С., Проектирование электрических машин, М.: Высшая школа, 2001.
10. Слодарж М, Н. Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 2017.
11. Липкин Б. Ю. Электрооборудование промышленных предприятий и установок. – М.: Высшая школа, 2015.
12. Строительные нормы и правила СН и П П-М 2-62 и А5-62 – М.: Госстройиздат, 2013.
13. ГОСТ 17677\*82 (ст. СЭВ 3182–82). Светильники. Общие технические условия; М., Издательство стандартов., 2017.