

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Институт электронного обучения
Специальность Электромеханика
Кафедра Электротехнических комплексов и материалов

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

Тема работы
Проектирование асинхронного двигателя с фазным ротором для привода конвейера
УДК 621.313.333.1:621.867.001.63

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-7311	Махмудов К. М.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Серов А. Б.			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Технология производства»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Баранов П. Р.	К.Т.Н.		

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н. Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин А. А.	К.Т.Н.		

По разделу «Электромагнитный расчет» специальная часть

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Серов А.Б.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Гарганеев А. Г.	Д.Т.Н.		

Томск – 2017 г.

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт электронного обучения
Направление подготовки (специальность) 140601 Электромеханика
Кафедра: Электротехнических комплексов и материалов

УТВЕРЖДАЮ:
Заведующий кафедрой ЭКМ

(Подпись) _____ (Дата) Гарганеев А.Г.
(Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Дипломный проект

Студенту:

Группа	ФИО
3-7311	Махмудов Козимхон Манап Угли

Тема работы:

Проектирование асинхронного двигателя с фазным ротором для привода конвейера	
Утверждена приказом ректора (дата, номер)	№ 2259/с, от 30.03.2017 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	31.05.2017г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Номинальная мощность $P_{2н} = 22$ кВт; Число фаз $m = 3$; Номинальное напряжение $U_n = 220/380$ В; Число полюсов $2p = 8$; Частота сети $f = 50$ Гц; Высота оси вращения $h = 225$ мм; Степень защиты IP – 54; Способ монтажа IM 1001; Система охлаждения IC 0141.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи</i>	1. Аналитический обзор литературы по проектированию асинхронных машин с фазным ротором. 2. Электромагнитный расчет электродвигателя. 3. Расчет регулировочных резисторов, построение механической характеристики.

исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	4. Технологический процесс общей сборки электродвигателя. 5. Технико-экономическое обоснование производства асинхронного электродвигателя. 6. Безопасность технологического процесса сборки асинхронного электродвигателя.
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	1. Презентация в программе Microsoft PowerPoint. 2. Сборочный чертеж. 3. Рабочие и пусковые характеристики. 4. Обмотка статора и ротора. 5. Спецчасть (механическая характеристика). 6. Технологическая часть (сборочный чертеж). 7. Сборочный чертеж ротора.

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы (с указанием разделов)	
Раздел	Консультант
Электромагнитный расчет и специальная часть	Серов А.Б..
Экономическая часть	Кузьмина Н.Г
Социальная ответственность	Сечин А.А.
Технологическая часть	Баранов П.Р.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.12.2015 г.
---	---------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ЭКМ	Серов Александр Борисович			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-7311	Махмудов Козимхон Манап Угли		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА ПО ТЕМЕ:
«ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН»**

Студенту:

Группа	ФИО
3-7311	Махмудову К.М.

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Специалист	Направление/специальность	140601.65 Электромеханика

Исходные данные к разделу «Технологический процесс сборки статора асинхронного двигателя с фазным ротором»

1. Сборочный чертеж статора асинхронного двигателя с фазным ротором, спецификация 22 кВт, $2p=3$;

2. Годовая программа выпуска изделия 5000 штук

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конструкции статора электрической машины на технологичность

2. Рассчитать усилие запрессовки сердечника с катушкой в станину и выбрать тип пресса

3. Составить схему сборки статора электрической машины

3. Выбрать оборудование, приспособления для сборки, мех. обработки статора

4. Разработать маршрутную технологию сборки статора электрической машины

5. Определить нормы времени на операции и оборудование

6. Построить график загрузки оборудования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Комплект маршрутных карт и карты эскизов (в приложении)

2. График загрузки оборудования

3. Схема сборки статора

4. Технологическая схема запрессовки

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Баранов П.Р.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-7311	Махмудов К.М.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-7311	Махмудов К.М.

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	специалитет	Направление/специальность	140601 Электромеханика

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

3. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	...
---	-----

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

2. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>	<i>Определение конкурентоспособности проекта, анализ рынка продукта</i>
3. <i>Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР</i>	<i>Определение себестоимости ИР</i>
4. <i>Составление бюджета инженерного проекта (ИП)</i>	<i>Определение затрат проекта</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

5. <i>Оценка конкурентоспособности</i>
6. <i>График разработки и внедрения</i>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Кузьмина Н. Г.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-7311	Махмудов К.М.		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-7311	Махмудов К.М.

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования		Направление/специальность	140601 Электромеханика

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:
1. Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения: – вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения) – опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы) – негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу) – чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)
Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:
1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности: – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью; – предлагаемые средства защиты ;
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности – механические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)
3. Охрана окружающей среды: - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);
4. Защита в чрезвычайных ситуациях: - перечень возможных ЧС на объекте; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин А.А.	К.Т.Н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-7311	Махмудов К.М.		

Реферат

Выпускная квалификационная работа (ВКР): листов 160, таблиц 19, рисунков 24, источников литературы 33, графического материала 5 листов.

Ключевые слова: двигатель асинхронный с фазным ротором, статор, ротор, однослойная обмотка, пусковые реостаты, рабочие и пусковые характеристики.

Объектом исследования является асинхронный двигатель с фазным ротором, запускающийся с помощью пусковых реостатов.

Целью работы является проектирование асинхронного двигателя с фазным ротором для привода конвейера. Проведен электромагнитный, тепловой и механический расчёты, разработана технология производства статора на программу выпуска 5000 шт./год, проведен экономический расчёт производства двигателя 5000 шт./год, проверена безопасность и экологичность проекта, разработаны чертежи по данным разделам.

ВКР рассчитана с помощью программы Mathcad 14, текст выполнен в текстовом редакторе Microsoft Word 2010 на белой бумаге формата А4. Чертежи выполнены в графическом редакторе КОМПАС 3D V15 на белой бумаге формата А3.

В процессе разработки определены главные размеры двигателя, энергетические, рабочие и пусковые характеристики. Составлена тепловая схема, и проведен тепловой расчет. Рассчитаны механические характеристики вала на жесткость и прочность. В специальной части проведен расчёт и выбор пусковых сопротивлений. Разработана технология производства статора по заданной программе выпуска 5000 шт./год. Рассчитана себестоимость единиц продукции, определен критический объём производства и рентабельность. Рассмотрена производственная и экологическая безопасность проекта.

Основные конструктивные, технические и технико-экономические характеристики: способ монтажа IM1001 – двигатель на лапах с двумя подшипниковыми щитами; степень защиты IP54 – от попадания влаги внутрь корпуса; система охлаждения IC0141 – с наружным вентилятором, расположенный на валу двигателя; режим работы S1 – продолжительный.

Область применения: асинхронный двигатель с фазным ротором применяется для привода конвейера карусельно-разливочной машины используемый для разлива меди, с анодных печей в изложницы. Карусельно-разливочная машина установлена в Медеплавильном заводе (МПЗ) АО «Алмалыкского горно-металлургического комбината» (АО «АГМК»).

Оглавление

Введение	12
Исходные данные	15
Обзор литературы на тему асинхронных двигателей с фазным ротором	16
1. Электромагнитный расчет	26
1.1. Выбор главных размеров	26
1.2. Расчет обмоток статора	27
1.3. Расчет размеров зубцовой зоны статора	30
1.4. Расчет фазного ротора	33
1.5. Расчет магнитной цепи	38
1.6. Параметры рабочего режима	41
1.7. Расчет потерь	46
1.8. Холостой ход	50
1.9. Расчет рабочих характеристик	51
1.10. Расчет пусковых характеристик	55
2. Тепловой расчет	63
3. Механический расчет	81
3.1. Расчет вала на жесткость	82
3.2. Расчет вала на прочность	85
3.3. Выбор подшипников	87
4. Специальная часть	90
5. Технологический процесс сборки статора асинхронного двигателя с фазным ротором	100
5.1. Анализ исходных данных	101
5.2. Служебное назначение и особенности конструкции статора	102
5.3. Оценка технологичности конструкции статора	103
5.4. Расчет усилий запрессовки статора в станину и выбор оборудования и оснастки для запрессовки	105
5.5. Выбор технологического оборудования и оснастки	109

5.6.	Техническое нормирование операций	110
5.7.	Расчет количества оборудования для выполнения	113
6.	Смета затрат на проектирование	115
6.1.	Смета затрат на подготовку проекта	117
6.2.	Отчисления на социальные нужды	118
6.3.	Материальные затраты на канцелярские товары	119
6.4.	Амортизация вычислительной техники	119
6.5.	Прочие неучтенные затраты	120
6.6.	Накладные расходы	120
6.7.	Себестоимость проекта	120
6.8.	Оценка технического уровня	121
7.	Социальная ответственность	125
7.1.	Анализ опасных и вредных факторов	125
7.2.	Техника безопасности	126
7.2.1.	Общие правила	126
7.2.2.	Электробезопасность	127
7.3.	Производственная санитария	128
7.3.1.	Шум и вибрация	128
7.3.2.	Психологические факторы	132
7.3.3.	Микроклимат	132
7.3.4.	Образование вредных веществ	134
7.3.5.	Освещение	134
7.4.	Пожарная безопасность	135
7.5.	Охрана окружающей среды	138
7.6.	Расчет искусственного освещения	139
7.6.1.	Выбор источников света	140
7.6.2.	Выбор системы освещения	140
7.6.3.	Выбор коэффициента запаса	141
7.6.4.	Выбор светильника	141
7.6.5.	Размещение осветительных приборов	141
7.6.6.	Расчет осветительной установки	142

7.7. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	144
Заключение	149
Список использованных источников	152

Графические материалы

ФЮРА 526600.001 СБ	Асинхронная двигатель с фазным ротором
ФЮРА 684222.001 СБ	Статор
ФЮРА 684261.001 СБ	Ротор
ФЮРА 526600.001	Пусковая диаграмма. Специальная часть
ФЮРА 526600.001	Обмотка статора
ФЮРА 526600.001	Обмотка ротора

Введение

Проектируемый асинхронный двигатель с фазным ротором предназначен для привода конвейера карусельно-разливочной машины применяемый для разлива меди, с анодных печей в изложницы. Карусельно-разливочная машина установлена в Медеплавильном заводе (МПЗ) АО «Алмалыкского горно-металлургического комбината» (АО «АГМК»).

АО «АГМК» является одним из крупнейших горно-металлургических предприятий в Республике Узбекистан [2].

Четыре горнодобывающих предприятия, две обогатительные фабрики, два металлургических завода, три сернокислотных производства, ремонтно-механический и известковый заводы, два автотранспортных управления с пятью автобазами, управление железнодорожного транспорта, а также 22 вспомогательных цеха и предприятия входят в состав комбината.

На комбинате ежегодно добывается 37 млн.м.куб. горной массы, извлекается 12 химических элементов, выпускается 18 видов промышленной продукции, в том числе медные, свинцовые, цинковые, молибденовые концентраты, цинк металлический, рафинированная медь, селен, теллур, серная кислота, металлический кадмий и аффинированные драгоценные металлы. В стадии проработки находится технология производства перрената аммония из молибденового промпродукта и промывной кислоты.

Металлургический цех оснащен отражательной печью мощностью до 50 тыс. тонн черновой меди в год, печью кислородно-факельной плавки мощностью 65 тыс. тонн в год, четырьмя горизонтальными поворотными конвертерами емкостью 200 тонн каждая.

С отражательной печи получают медный штейн, который поступает в конвертеры. Основной целью конвертерного передела является переработка медного штейна с целью получения черновой меди и технологических газов для производства серной кислоты. Также в наклонных анодных печах освоено огневое рафинирование меди – удаление из черновой меди железа, серы, свинца и других более электроотрицательных, чем медь, примесей.

печей в излотницы. Такая медь называется анодной.

рисунке 4.

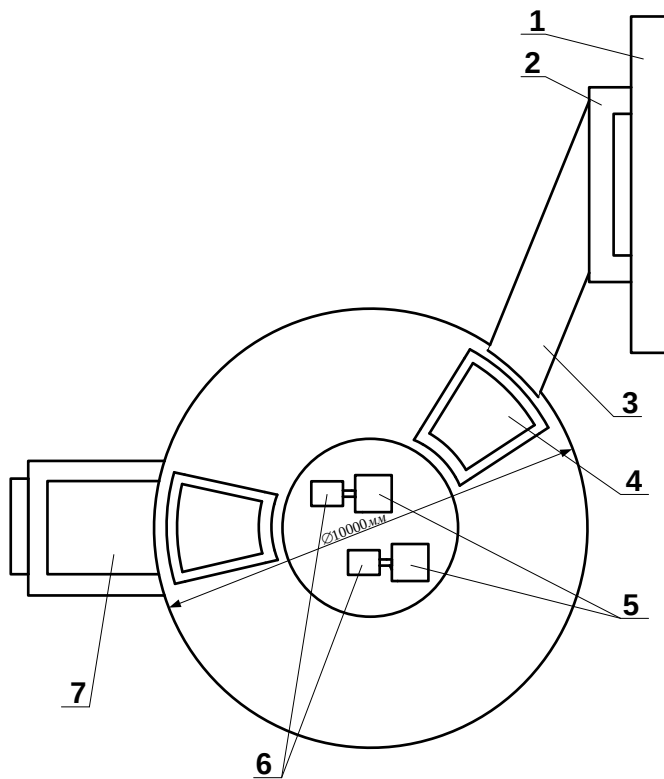


Рисунок 1. Принципиальная схема карусельно – разливочной машины

1 – Анодная печь. 2 – Летня. 3 – Сливной желоб. 4 – Излотница. 5 – Электродвигатели. 6 – Редукторы. 7 – Аноdoneц

каруселью. Барабан имеет отверстия в виде контейнеров – изложницами. С анодной печи через летню в эти контейнеры разливается расплавленная медь, которая транспортируется в анодонец.

имеет плавный пуск и большой пусковой момент. Для этого был выбран асинхронный двигатель с фазным ротором.

Пуск двигателя осуществляется с помощи пусковых реостатов. Для уменьшения пускового тока обмотка ротора замыкается на пусковой реостат через контактные

кольца и щетки. Перед пуском двигателя нужно убедиться в том, что сопротивление пускового реостата полностью введено.

Поэтому в ВКР была выполнена разработка асинхронного двигателя с фазным ротором для привода конвейера. Основной технологической особенностью двигателя является регулирование частоты вращения в необходимых пределах с помощью пусковых реостатов и большой пусковой момент, обеспечивающий пуск механизма (карусельно – разливочная машина).

Для решения этой задачи необходимо провести электромагнитный, тепловой, механический расчёты, разработать технологию производства статора на программу выпуска 5000 шт./год, произвести экономический расчёт производства двигателя 5000 шт./год, создать безопасность и экологичность проекта, разработать чертежи по данным разделам. Расчет, выбор пусковых реостатов и построение пусковой диаграммы приведен в специальной части.

Электромагнитный расчет проведен в соответствии с методикой проектирования литературы «Проектирование электрических машин: Учеб.пособие для вузов/И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др.; Под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. – 496 с.».

Асинхронные двигатели с фазным ротором более экономичные с точки зрения потребления электроэнергии в сравнении с частотно регулируемые и другими системами, где необходимо регулирование частоты вращения в необходимых пределах.

Исходные данные

В данной дипломной работе мы с проектирован асинхронный двигатель с фазным ротором со следующими параметрами:

Полезная мощность $P_2 = 22$ кВт.

Число полюсов $2p = 8$.

Номинальное фазное напряжение 220/380 В.

Частота сети $f = 50$ Гц.

Исполнение по степени защиты IP54.

Исполнение по монтажу IM1001.

Система охлаждения IC0141

Обзор литературы на тему асинхронных двигателей с фазным ротором

Асинхронная машина - это электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора.

В ряде стран к асинхронным машинам причисляют также коллекторные машины. В России асинхронными машинами стали называть машины, которые

являются индукционными.

Асинхронные машины сегодня составляют большую часть электрических машин. В основном они используются как электродвигатели и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую.

Достоинства асинхронных электродвигателей:

Широкое распространение трехфазных асинхронных двигателей объясняется простотой их конструкции, надежностью в работе, хорошими эксплуатационными свойствами, невысокой стоимостью и простотой в обслуживании.

Недостатки:

1. Небольшой пусковой момент.
2. Значительный пусковой ток.

Асинхронная машина имеет статор и ротор, разделённые воздушным зазором. Её активными частями являются обмотки и магнитопровод; все остальные части - конструктивные, обеспечивающие необходимую прочность, жёсткость, охлаждение, возможность вращения и т.п.

Обмотка статора представляет собой трёхфазную (в общем случае - многофазную) обмотку, проводники которой равномерно распределены по окружности статора и пофазно уложены в пазах с угловым расстоянием 120 эл. град. Фазы обмотки статора соединяют по стандартным схемам "треугольник" или "звезда" и подключают к сети трёхфазного тока. Магнитопровод статора переманивается в процессе изменения (вращения) магнитного потока обмотки возбуждения, поэтому его изготавливают шихтованным (набранным из пластин) из электротехнической стали для обеспечения минимальных магнитных потерь.

По конструкции ротора асинхронные машины подразделяют на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором. Оба типа имеют одинаковую конструкцию статора и отличаются лишь исполнением обмотки ротора. Магнитопровод ротора выполняется аналогично магнитопроводу статора - из электротехнической стали и шихтованным.

Способы управления асинхронным двигателем:

Под управлением асинхронным двигателем переменного тока понимается изменение частоты вращения ротора и/или его момента. Существуют следующие

способы управления асинхронным двигателем:

- реостатный - изменение частоты вращения АД с фазным ротором путём изменения сопротивления реостата в цепи ротора, кроме того это увеличивает пусковой момент;
- частотный - изменение частоты вращения АД путём изменения частоты тока в питающей сети, что влечёт за собой изменение частоты вращения поля статора. Применяется включение двигателя через частотный преобразователь
- переключением обмоток со схемы "звезда" на схему "треугольник" в процессе пуска двигателя, что даёт снижение пусковых токов в обмотках примерно в три раза, но в то же время снижается и момент;
- импульсный - подачей напряжения питания специального вида (например, пилообразного);
- введение добавочной э. д. с с согласно или противонаправлено с частотой скольжения во вторичную цепь.
- изменением числа пар полюсов, если такое переключение предусмотрено конструктивно (только для к. з. роторов);
- изменением амплитуды питающего напряжения, когда изменяется только амплитуда (или действующее значение) управляющего напряжения. Тогда векторы напряжений управления и возбуждения остаются перпендикулярны (автотрансформаторный пуск);
- фазовое управление характерно тем, что изменение частоты вращения ротора достигается путём изменения сдвига фаз между векторами напряжений возбуждения и управления;
- амплитудно-фазовый способ включает в себя два описанных способа;
- включение в цепь питания статора реакторов;
- индуктивное сопротивление для двигателя с фазным ротором.

Устройство асинхронных электродвигателей с фазным ротором:

Основными частями любого асинхронного двигателя является неподвижная часть - статор и вращающаяся часть, называемая ротором.

Статор трехфазного асинхронного двигателя состоит из шихтованного магнитопровода, запрессованного в литую станину. На внутренней поверхности магнитопровода имеются пазы для укладки проводников обмотки. Эти проводники являются сторонами многовитковых мягких катушек, образующих три фазы обмотки статора. Геометрические оси катушек сдвинуты в пространстве друг относительно друга на 120 градусов.

Фазы обмотки можно соединить по схеме "звезда" или "треугольник" в зависимости от напряжения сети. Например, если в паспорте двигателя указаны напряжения 220/380 В, то при напряжении сети 380 В фазы соединяют "звездой". Если же напряжение сети 220 В, то обмотки соединяют в "треугольник". В обоих случаях фазное напряжение двигателя равно 220 В.

Ротор трехфазного асинхронного двигателя представляет собой цилиндр, набранный из штампованных листов электротехнической стали и насаженный на вал. В зависимости от типа обмотки роторы трехфазных асинхронных двигателей делятся на короткозамкнутые и фазные.

Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства. Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток - ограниченный пусковой момент. Доливо-Добровольский назвал причину этого недостатка - сильно закороченный ротор. Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором.

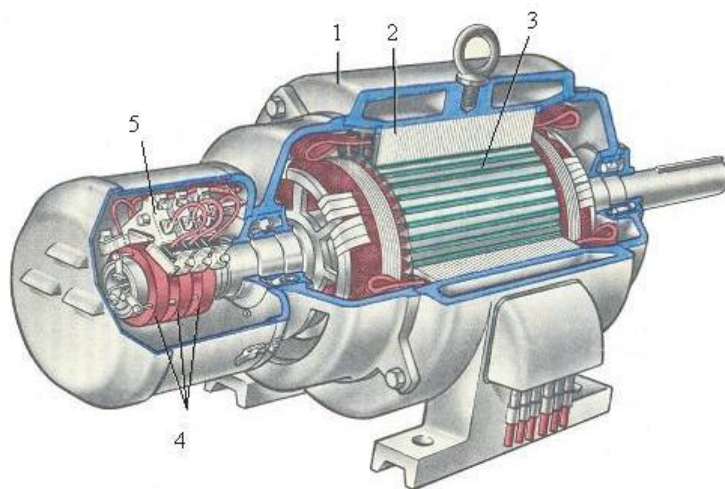


Рисунок.2 Приведен вид асинхронной машины с фазным ротором в разрезе: 1 - станина, 2 -

обмотка статора, 3 - ротор, 4 - контактные кольца, 5 - щетки.

У фазного ротора обмотка выполняется трёхфазной, аналогично обмотке статора, с тем же числом пар полюсов. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме звезда. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закреплёнными на валу ротора, и через щётки выводятся во внешнюю цепь. Контактные кольца изготавливают из латуни или стали, они должны быть изолированы друг от друга и от вала. В качестве щёток используют металлографитовые щётки, которые прижимаются к контактным кольцам с помощью пружин щёткодержателей, закреплённых неподвижно в корпусе машины.

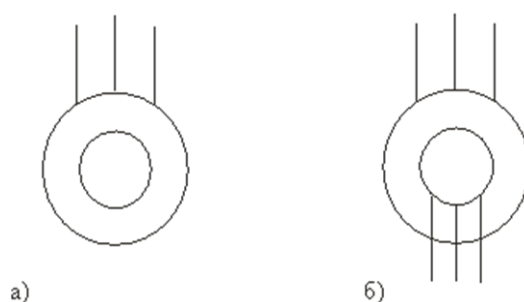


Рисунок.3 Приведено условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором.

Асинхронный двигатель с фазным ротором имеет лучшие пусковые и регулировочные свойства, однако ему присущи большие масса, размеры и стоимость, чем асинхронному двигателю с короткозамкнутым ротором.

Принцип работы асинхронных электродвигателей:

Принцип работы асинхронной машины основан на использовании вращающегося магнитного поля. При подключении к сети трехфазной обмотки статора создается вращающееся магнитное поле, угловая скорость которого определяется частотой сети f и числом пар полюсов обмотки p , т.е. $\omega_1 = 2\pi f/p$

Пересекая проводники обмотки статора и ротора, это поле индуцирует в обмотках ЭДС (согласно закону электромагнитной индукции). При замкнутой обмотке ротора ее ЭДС наводит в цепи ротора ток. В результате взаимодействия тока с результирующим магнитным полем создается электромагнитный момент. Если этот момент превышает момент сопротивления на валу двигателя, вал

начинает вращаться и приводить в движение рабочий механизм. Обычно угловая скорость ротора ω_2 не равна угловой скорости магнитного поля ω_1 , называемой синхронной. Отсюда и название двигателя асинхронный, т.е. несинхронный.

Работа асинхронной машины характеризуется скольжением s , которое представляет собой относительную разность угловых скоростей поля ω_1 и ротора ω_2 : $s = (\omega_1 - \omega_2) / \omega_1$

Значение и знак скольжения, зависящие от угловой скорости ротора относительно магнитного поля, определяют режим работы асинхронной машины. Так, в режиме идеального холостого хода ротор и магнитное поле вращаются с одинаковой частотой в одном направлении, скольжение $s=0$, ротор неподвижен относительно вращающегося магнитного поля, ЭДС в его обмотке не индуцируется, ток ротора и электромагнитный момент машины равны нулю. При пуске ротор в первый момент времени неподвижен: $\omega_2=0$, $s=1$. В общем случае скольжение в двигательном режиме изменяется от $s=1$ при пуске до $s=0$ в режиме идеального холостого хода.

При вращении ротора со скоростью $\omega_2 > \omega_1$ в направлении вращения магнитного поля скольжение становится отрицательным. Машина переходит в генераторный режим и развивает тормозной момент. При вращении ротора в направлении, противоположном направлению вращения магнитного поля ($s > 1$), асинхронная машина переходит в режим противовключения и также развивает тормозной момент. Таким образом, в зависимости от скольжения различают двигательный ($s=1 \div 0$), генераторный ($s=0 \div -\infty$) режимы и режим противовключения ($s=1 \div +\infty$). Режимы генераторный и противовключения используют для торможения асинхронных двигателей

Фазный ротор:

Фазный ротор имеет трехфазную (в общем случае - многофазную) обмотку, обычно соединённую по схеме "звезда" и выведенную на контактные кольца, вращающиеся вместе с валом машины. С помощью металлографитовых щёток, скользящих по этим кольцам, в цепь обмотки ротора:

➤ включают пускорегулирующий реостат, выполняющий роль

добавочного активного сопротивления, одинакового для каждой фазы. Снижая пусковой ток, добиваются увеличения пускового момента до максимального значения (в первый момент времени). Такие двигатели применяются для привода механизмов, которые пускают в ход при большой нагрузке или требующих плавного регулирования скорости.

- включают индуктивности (дрессели) в каждую фазу ротора. Сопротивление дресселей зависит от частоты протекающего тока, а, как известно, в роторе в первый момент пуска частота токов скольжения наибольшая. По мере раскрутки ротора частота индуцированных токов снижается, и вместе с нею снижается сопротивление дресселя. Индуктивное сопротивление в цепи фазного ротора позволяет автоматизировать процедуру запуска двигателя, а при необходимости - "подхватить" двигатель, у которого упали обороты из-за перегрузки. Индуктивность держит токи ротора на постоянном уровне.
- включают источник постоянного тока, получая таким образом синхронную машину.
- включают питание от инвертора, что позволяет управлять оборотами и моментными характеристиками двигателя. Это особый режим работы (машина двойного питания). Возможно включение напряжения сети без инвертора, с фазировкой, противоположной той, которой запитан статор.

Пуск асинхронного двигателя с фазным ротором:

Пусковые условия асинхронного двигателя с фазной обмоткой ротора можно существенно улучшить ценой некоторого усложнения конструкции и обслуживания двигателя.

Т.к. активное сопротивление фазной обмотки ротора относительно мало, то для получения максимального начального пускового момента необходимо в цепь ротора включить пусковой реостат с сопротивлением фазы

Как только ротор начинает вращаться, уменьшается скольжение, а в месте с ним ЭДС и ток ротора, вследствие чего уменьшается вращающий момент. Чтобы

двигатель продолжал развивать вращающий момент, близкий к максимальному, сопротивление пускового реостата нужно постепенно уменьшать. Наконец когда двигатель достигает номинальной частоты вращения, пусковой реостат замыкают накоротко.

Для уменьшения механических потерь и износа колец и щеток двигателя снабжаются иногда приспособлением для подъема щеток и замыкания колец накоротко.

Чем больше должен быть пусковой момент, чем ближе он к максимальному моменту, тем больше будет и пусковой ток. По этой причине лишь для особо тяжелых условий пуска реостат подбирается так, чтобы пусковой момент был равен максимальному.

Чтобы пусковой реостат в течение времени пуска не перегревался, его мощность должна примерно равняться мощности двигателя. Для двигателей большой мощности пусковые реостаты изготавливаются с масляным охлаждением.

Конечно, применение пускового реостата значительно улучшает пусковые условия асинхронного двигателя, повышая пусковой момент и уменьшая пусковой ток.

Реостатное регулирования:

В трехфазных асинхронных двигателях с фазным ротором применяется реостатный способ регулирования частоты вращения ротора. Это достигается введением в цепь фазных обмоток ротора регулируемого трехфазного реостата, как при пуске двигателя. Но этот реостат должен быть рассчитан на длительную нагрузку током ротора, а не на кратковременную, как пусковой реостат. Увеличение активного сопротивления цепи ротора изменяет характеристику $M_{вр}(s)$ - делает ее более мягкой. Если при постоянном моменте на валу двигателя увеличивать активное сопротивление цепи ротора путем постепенного увеличения сопротивления реостата ($r_{p1} < r_{p2} < r_{p3}$), то рабочая точка будет с одной кривой $M_{вр}(s)$ на следующую, соответствующую возросшему сопротивлению цепи ротора, соответственно чему растёт скольжение, а, следовательно, уменьшается частота вращения двигателя. Этим путем можно изменять частоту вращения ротора в

пределах от номинальной до полной остановки. Недостатком такого способа регулирования являются относительно большие потери энергии.

Таблица.1 Основные неисправности асинхронного двигателя с фазным ротором

Неисправность	Возможная причина
Не развивает номинальную скорость вращения и гудит	Одностороннее притяжение ротора вследствие: а) износа подшипников; б) перекоса подшипниковых щитов; в) изгиба вала
Плохо развивает скорость и гудит, ток во всех трех фазах различен и даже на холостом ходу превышает номинальный	1. Неправильно соединены обмотки и одна из фаз оказалась "перевернутой" 2. Оборван стержень обмотки ротора
Ротор не вращается или вращается медленно, двигатель гудит	Оборвана фаза обмотки статора
Вибрирует вся машина	1. Нарушено центрирование соединительных полумуфт или соосность валов 2. Неуравновешены ротор, шкив и полумуфты
Вибрация исчезает после отключения от сети, ток в фазах статора становится неодинаков, один из участков обмотки статора быстро нагревается	Короткое замыкание в обмотке статора
Перегревается при номинальных перегрузках	1. Витковое замыкание в обмотке статора 2. Загрязнение обмоток или вентиляционных каналов

Продолжение таблицы 1

Низкое сопротивление	1. Увлажнение или загрязнение обмоток 2. Старение изоляции
----------------------	--

В заключении обзора стоит отметить, что асинхронные электрические двигатели трехфазного типа с короткозамкнутым ротором широко используют в народном хозяйстве, однако такие двигатели обладают рядом недостатков: отсутствует плавное регулирование частоты вращения, большой пусковой ток и др. Но все это можно обойти, если же вместо ротора воспользоваться фазным ротором.

Подобающим образом устроен фазный ротор: трехфазная обмотка размещена в пазах ротора, (обмотка подобная обмотке статора); звездой соединены фазы обмотки ротора; начала фаз соединены с изготовленными из латуни или меди тремя контактными кольцами, которые в свою очередь укреплены на одном валу с ротором. Соответственно контактные кольца изолированы друг от друга и от вала. К контактным кольцам хорошо прижаты металло-графитные или угольные щётки, установленные на щёткодержателе, укрепленном на подшипниковом щите.

Для запуска двигателя с фазным ротором щётки соединяют с регулировочными или пусковыми реостатами. Эти самые реостаты дают возможность понизить пусковой ток, так как из-за них усиливается всеобщее сопротивление обмотки ротора.

Реостаты применяют для плавного регулирования частоты вращения двигателя, а также в изменении других рабочих характеристик.

1. Электромагнитный расчет

1.1. Выбор главных размеров

К главным размерам машины относят внутренний диаметр магнитопровода статора D и расчетная длина воздушного зазора l_δ . Выбираем наружный диаметр магнитопровода статора [1, таблица 6.6], при $h=225$ мм выбираем:

$$D_a = 0.4 \text{ м}$$

Внутренний диаметр магнитопровода статора рассчитываем по [1, формула 6.2]:

$$D = k_d \cdot D_a = 0.73 \cdot 0.4 = 0.292 \text{ м}$$

где k_d – коэффициент, характеризующий отношение внутреннего и наружного диаметра сердечника статора. Согласно рекомендациям [1, таблица 6.7] при $2p=8$ выбираем $k_d = 0.73$.

Полюсное деление τ найдем из [1, формула 6.3]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0.292}{2 \cdot 4} = 0.115 \text{ м}$$

Расчетная мощность P' находится по [1, формула 6.4]:

$$P' = \frac{P_{2н} \cdot k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{22000 \cdot 0.96}{0.87 \cdot 0.82} = 29605 \text{ Вт}$$

где k_E – коэффициент ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, принимаем $k_E = 0.96$ [1, рисунок 6.8].

η – коэффициент полезного действия (КПД), принимаем $\eta = 0.87$ при $P_2=22$ кВт и $2p=8$ [1, рисунок 6.9].

Электромагнитные нагрузки – линейная нагрузка A и индукция в воздушном зазоре B_δ – сильно влияют на размеры двигателя. Предварительный выбор электромагнитных нагрузок: [1, рисунок 6.11 б] исходя из $D_a=0.4$ м выбираем:

$$B_\delta = 0.8 \text{ Тл} \quad A = 35 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

Выбираем обмоточный коэффициент $k_{об1}=0.96$. принимаем предварительно для однослойной обмотки.

Рассчитаем синхронную угловую частоту вала двигателя по [1, формула 6.5]:

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{4} = 78.54 \text{ рад/с}$$

Коэффициент формы поля подсчитаем

$$K_b = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1.11$$

Рассчитаем длину воздушного зазора по [1, формула 6.6]:

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \cdot \Omega \cdot K_b \cdot K_{o61} \cdot A \cdot B_\delta} = \frac{29605}{0.292^2 \cdot 78.54 \cdot 1.11 \cdot 0.96 \cdot 35 \cdot 10^3 \cdot 0.8} = 0.148 \text{ м}$$

В асинхронных двигателях, длина сердечников которые не превышает 250...30 мм, радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции $l_{ст1} = l_\delta = 0.148 \text{ м}$.

Произведём проверку:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{0.148}{0.115} = 1.3$$

Полученное значение λ входит в область рекомендуемых пределов (1.3-2.1), показанных на [1, рисунок 6.14 а]. Следовательно, главные размеры двигателя выбраны правильно. Окончательно примем: $D_a=0.4 \text{ м}$; $D=0.292 \text{ м}$; длина сердечника статора $l_1=l_\delta=0.148 \text{ м}$

1.2. Расчет обмоток статора

Этот этап расчета включает определение числа пазов статора Z_1 и числа витков w_1 в фазе обмотки статора. При этом, число витков фазы обмотки статора должно быть таким, чтобы линейная нагрузка двигателя и индукция в воздушном зазоре как можно более близко совпадали с их предварительно принятыми значениями, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки.

Выбираем предельные значения зубцового деления t_{z1} [1, рисунок 6,15] при $\tau=0.099 \text{ м}$:

$$t_{z1\max}=0.01 \text{ м}; \quad t_{z1\min}=0.013 \text{ м}$$

тогда возможное число пазов статора Z_1 найдем по [1, формула 6.16]:

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1\max}} = \frac{\pi \cdot 0.292}{0.01} = 70.57 \quad Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1\min}} = \frac{\pi \cdot 0.292}{0.013} = 91.73$$

Выберем окончательно число пазов статора $Z_1=72$. Выбор обосновывается тем, что число пазов статора в асинхронных двигателях должно быть кратно числу фаз, а число пазов на полюс и фазу q чаще всего целым.

Проверим число пазов на полюс и фазу q:

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{72}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 3$$

Окончательное значение зубцового деления статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0.292}{2 \cdot 4 \cdot 3 \cdot 3} = 0.0127 \text{ м}$$

Подсчитаем номинальный ток обмотки статора [1, формула 6.18]:

$$I_{1\text{ном}} = \frac{P_{2\text{н}}}{m_1 \cdot U_{1\text{ном}} \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{22000}{3 \cdot 220 \cdot 0.87 \cdot 0.82} = 46.72 \text{ А}$$

Предварительное число эффективных проводников в пазу [1, формула 6.17]:

$$u'_\pi = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1\text{ном}} \cdot Z_1} = \frac{\pi \cdot 0.292 \cdot 35 \cdot 10^3}{46.72 \cdot 72} = 9.01$$

Число параллельных ветвей примем: $a = 2$

Окончательное значение числа проводников [1, формула 6.19]: $u_\pi = a \cdot u'_\pi = 2 \cdot 9.01 = 18.02$

тогда $u_\pi = 18$

Окончательное число витков в фазе обмотки [1, формула 6.20]:

$$w_1 = \frac{u_\pi \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{18 \cdot 72}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 108$$

Окончательное значение линейной нагрузки [1, формула 6.21]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1\text{ном}} \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 46.72 \cdot 108 \cdot 3}{\pi \cdot 0.292} = 33006 \frac{\text{А}}{\text{м}}$$

Рассчитаем значение магнитного потока [1, формула 6.22]:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1\text{ном}}}{4 \cdot k_b \cdot w_1 \cdot k_{o61} \cdot f_1} = \frac{0.96 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 108 \cdot 0.9598 \cdot 50} = 0.0092 \text{ Вб}$$

где обмоточный коэффициент однослойной обмотки статора [1, формула 3.6]:

$$k_{o61} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q \cdot m_1}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3}\right)}{3 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 3}\right)} = 0.9598$$

Определим значение индукции в воздушном зазоре [1, формула 6.23]:

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p}{D \cdot l_\delta} = \frac{0.0092 \cdot 4}{0.292 \cdot 0.148} = 0.848 \text{ Тл}$$

Значения A и B_δ находятся в допустимых пределах [1, рисунок 6.11 б].

Определим допустимую плотность тока в обмотке статора, с учетом линейной нагрузки двигателя [1, формула 6.25]:

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{214 \cdot 10^9}{33006} = 6.48 \cdot 10^6 \frac{A}{m^2}$$

где AJ – произведение линейной нагрузки на плотность тока [1, рисунок 6.11 б] при $D_a=0.4$ м; $AJ=214 \cdot 10^9 A^2/m^3$.

Предварительно сечение эффективного проводника [1, формула 6.24]:

$$q_{эф1} = \frac{I_{1ном}}{a \cdot J_1} = \frac{46.72}{2 \cdot 6.48 \cdot 10^6} = 3.603 \cdot 10^{-6} m^2$$

Выбираем сечение эффективного проводника (окончательно): принимаем

$n_{эл}=3$, тогда $q_{эл} = \frac{q_{эф1}}{n_{эл}} = \frac{3.603 \cdot 10^{-6}}{3} = 1.201 \cdot 10^{-6} m^2$. По [1, таблица П-28] находим

диаметр изолированного $d_{из}=1.33$ мм и неизолированного $d_{эл}=1.25$ мм провода.

Выбираем круглый медный провод марки ПЭТ-155, $q_{эл}=1.201$ мм²;

$q_{эф}=q_{эл} \cdot n_{эл}=1.201 \cdot 3=3.603$ мм².

Уточним плотность тока в обмотке статора (окончательно) [1, формула 6.27]:

$$J_1 = \frac{I_{1ном}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} = \frac{46.72}{2 \cdot (1.201 \cdot 10^{-6}) \cdot 3} = 6.483 \cdot 10^6 A/m^2$$

1.3. Расчет размеров зубцовой зоны статора

Площадь паза должна соответствовать количеству размещаемых в пазу проводников обмотки с учетом всей изоляции. Значение индукции в зубцах и ярме статора должны находиться в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника. Для проектируемого двигателя выбираем электротехническую сталь марки 2211, с коэффициентом заполнения сердечников статора и ротора $k_c=0,95$ [1, таблица 6.11]. Сердечники статора и ротора двигателя выполняются без радиальных вентиляционных каналов.

размеров обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов.

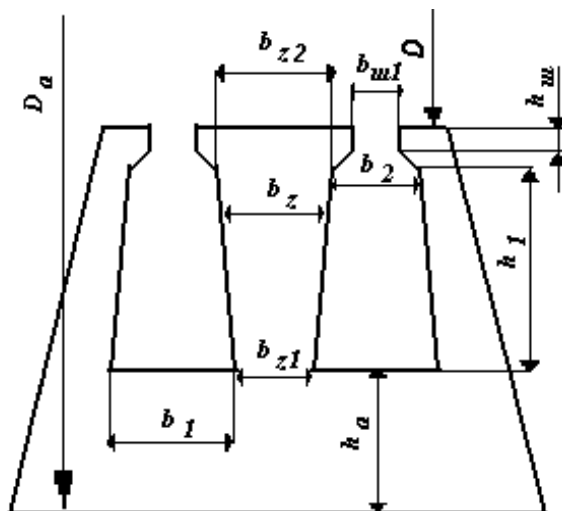


Рисунок 1.1. Трапецеидальный паз статора

По [1, таблица 6.10] предварительно для $2p=8$ выбираем допустимые значения индукции: ярмо статора $B_a=1.15$ Тл. Зубцы статора при постоянном сечении: $B_{z1}=1.6$ Тл.

Определим ширину зубцов статора [1, формула 6.29]:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{B_{z1} \cdot k_c} = \frac{0.848 \cdot 0.0127}{1.6 \cdot 0.95} = 7.112 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Определим высоту ярма статора [1, формула 6.28]:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0.0092}{2 \cdot 1.15 \cdot 0.148 \cdot 0.95} = 0.0283 \text{ m}$$

Размер паза в штампе принимаем: высота шлица $h_{III}=1$ мм

Ширина шлица паза выбираем из [1, таблица 6.12]: $b_{\text{ш}}=3.7$ мм

Найдем размеры паза в штампе [1, формула 6.40]:

$$h_{\Pi} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0.4 - 0.292}{2} - 0.0283 = 0.0257 \text{ м}$$

Ширина паза статора: Большой диаметр [1, формула 6.41]:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{\text{п}})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (0.292 + 2 \cdot 0.0257)}{72} - 7.112 \cdot 10^{-3} = 7.867 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Меньший диаметр [1, формула 6.42]:

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{III} - b_{III}) - Z_1 \cdot b_{z1}}{Z_1 - \pi} =$$

$$= \frac{\pi \cdot (0.292 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 3.7 \cdot 10^{-3}) - 72 \cdot 7.112 \cdot 10^{-3}}{72 - \pi} = 5.808 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Исходя из [1, формула 6.45] получим выражение для нахождения клиновой части паза:

$$h_1 = h_{\Pi} - \left(h_{\text{ш}} + \frac{b_2 - b_{\text{ш}}}{2} \right) = 0.0257 - \left(0.001 + \frac{5.808 \cdot 10^{-3} - 0.0037}{2} \right) = 0.0236 \text{ м}$$

Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку [1, формула 6.47]:

$$\Delta b_{\Pi} = 0.2 \text{ мм}; \quad \Delta h_{\Pi} = 0.2 \text{ мм}$$

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_{\Pi} = 7.867 - 0.2 = 7.667 \text{ мм}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_{\Pi} = 5.808 - 0.2 = 5.608 \text{ мм}$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_{\Pi} = 23.6 - 0.2 = 23.4 \text{ мм}$$

Одностороннюю толщину изоляции в пазу найдем по [1, таблица 3.8]: $b_{\text{из}} = 0.4 \text{ мм}$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пару [1, формула 6.48]:

$$S_{\text{из}} = b_{\text{из}} \cdot (2 \cdot h_{\Pi} + b_1 + b_2) = 0.4 \cdot (2 \cdot 25.7 + 7.867 + 5.808) = 25.99 \text{ мм}^2$$

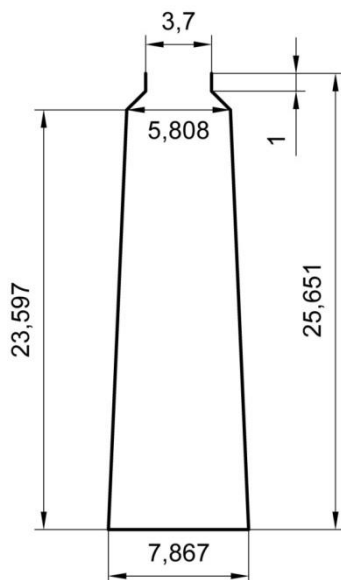
Площадь поперечного сечения оставшаяся для размещения проводников в обмотке [1, формула 6.51]:

$$S'_{\Pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 - S_{\text{из}} = \frac{7.667 + 5.608}{2} \cdot 23.4 - 25.99 = 129.3 \text{ мм}^2$$

Подсчитаем коэффициент заполнения паза [1, формула 3.2]:

$$k_3 = \frac{d_{\text{из}}^2 \cdot n_{\text{эл}} \cdot u_{\Pi}}{S'_{\Pi}} = \frac{1.33^2 \cdot 3 \cdot 18}{129.3} = 0.738$$

Коэффициент заполнения паза входит в область допустимых пределов $k_3 = 0.72 \dots 0.74$ для механизированной укладки обмотки двигателей $2p \geq 4$



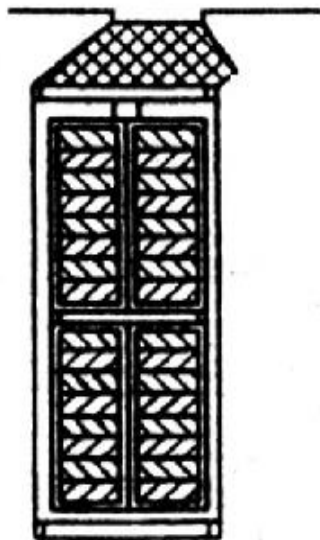


Рисунок 1.2. Паз статора

Рисунок 1.3. Паз статора
с заполнением

	Наименование	Материал
1	Клин пазовый	Стеклотекстолит СТЭФ – 1
2	Пазовая коробка	Стеклоткань ЛСК – 155/180
3	Обмоточный провод	ПЭТ 155

1.4. Расчет фазного ротора

Правильный выбор воздушного зазора δ во многом определяет энергетические показатели асинхронного двигателя. Чем меньше воздушный зазор, тем меньше его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, составляющие основную часть суммарной МДС магнитной цепи всей машины. Уменьшение воздушного зазора приводит к уменьшению МДС магнитной цепи и намагничивающего тока двигателя. Благодаря этому возрастает коэффициент мощности $\cos\varphi$ двигателя, и уменьшаются потери в меди отмотки статора. Однако, чрезмерное уменьшение δ приводит к возрастанию амплитуд пульсаций индукции в воздушном зазоре и, как следствие этого, к увеличению поверхностных и пульсационных потерь. Поэтому КПД двигателей с очень маленьким воздушным зазором не улучшается, а часто становится меньше.

Величину воздушного зазора выберем из [1, рисунок 6.21] для $2p=8$ и $D=0.292$ м: $\delta=0.5$ мм

Внешний диаметр ротора: $D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0.292 - 2 \cdot 0.0005 = 0.291$ м

Длина магнитопровода ротора принимаем: $l_1 = l_2 = 0.148$ м

Согласно рекомендациям, [1], выбираем катушечную обмотку ротора из прямоугольного провода. Основным элементом петлевой обмотки является катушка. Катушка предварительно наматывается на шаблон и затем через шлиц закладывается (всыпается) в полужакрытый предварительно изолированный паз сердечника. В каждый паз укладывается одна из двух сторон катушки ротора. После закладки всех проводников пазовая изоляция подгибается и вставляется клин, который предохраняет обмотку от выпадения из паза.

Число фаз обмотки ротора $m_2=m_1=3$, число пазов на полюс и фазу обмотки ротора $q_2=2$.

Число пазов ротора: $Z_2 = 2 \cdot p \cdot q_2 \cdot m_1 = 2 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 3 = 48$

Зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 291}{48} = 19 \text{ мм}$$

Предварительно задаёмся ЭДС фазы E_2 : $E_2=200$

Число витков в фазе рассчитываем по [1, формула 6.55]:

$$w_2 = \frac{E_2 \cdot w_1}{U_{1ном}} = \frac{200 \cdot 108}{220} = 98.182$$

Принимаем: $w_2 = 98$

Коэффициент учитывающий влияние тока намагничивания:

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\varphi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.82 = 0.856$$

Обмоточный коэффициент обмотки ротора:

$$k_{o62} = \frac{0.5}{q_2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot q_2 \cdot m_2}\right)} = \frac{0.5}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot 2 \cdot 3}\right)} = 0.966$$

Коэффициент приведения токов с фазными роторами [1, формула 6.61]:

$$v_i = \frac{m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o61}}{m_2 \cdot w_2 \cdot k_{o62}} = \frac{3 \cdot 108 \cdot 0.959}{3 \cdot 98 \cdot 0.966} = 1.1$$

Предварительное значение тока в обмотке фазного ротора [1, формула 6.60]:

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 0.856 \cdot 46.72 \cdot 1.1 = 43.798 \text{ A}$$

Проверяем напряжение на контактных кольцах ротора [1, формула 6.59]:

$$U_k = \sqrt{3} \cdot U_{1ном} \cdot \frac{w_2}{w_1} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot \frac{98}{108} = 199.6 \text{ В}$$

Число эффективных проводников в пазу: $a_2=2$

$$u_{п2} = \frac{2 \cdot m_2 \cdot w_2 \cdot a_2}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 98 \cdot 2}{48} = 24.5$$

Число эффективных проводников округляем до чётного числа: $u_{п2} = 24$

Уточняем число витков в фазе:

$$w_2 = \frac{u_{п2} \cdot p \cdot q_2}{a_2} = \frac{24 \cdot 4 \cdot 2}{2} = 98$$

Сечение эффективных проводников обмотки ротора

$$q_{эф2} = \frac{I_2}{J_2 \cdot a_2} = \frac{43.7978}{5 \cdot 10^6 \cdot 2} = 4.379 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

(плотность тока при классе нагревостойкости изоляции F принимает $J_2=5 \cdot 10^6$ А/м²).

Принимаем число элементарных проводников в одном эффективном $p_{эл2}=3$

$$q_{эл2} = \frac{q_{эф2}}{n_{эл2}} = \frac{4.379 \cdot 10^{-6}}{3} = 1.459 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Для обмотки ротора из [1, таблица П-28], из стандартного ряда проводов выбираем провод ближайший к полученному значению сечения элементарного провода: диаметр изолированного $d_{из2} = 1.405$ мм и неизолированного $d_{эл2} = 1.32$ мм провода. Выбираем прямоугольный медный провод марки ПЭТ-155: $q_{эл2} = 1.368 \text{ мм}^2$

Уточняем сечение эффективного проводника:

$$q_{эф2} = q_{эл} \cdot n_{эл2} = 1.368 \cdot 3 = 4.104 \text{ мм}^2$$

Уточняем допустимую плотность тока:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_{эф2}} = \frac{43.7978}{4.104 \cdot 10^{-6}} = 5.34 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

Выбираем пазы ротора полузакрытой формы. Размеры паза выбирают такими, чтобы зубцы ротора имели параллельные грани.

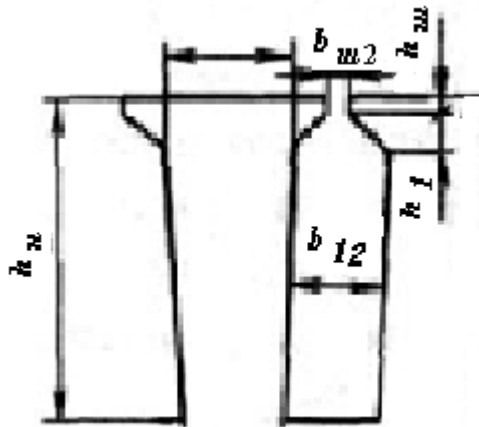


Рисунок 1.4. Полузакрытые пазы ротора

$$b_{ш2} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad h_{ш2} = 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Выбираем допустимую индукцию для зубцов ротора [1, таблица 6.10]:

$$B_{z2} = 1.75 \text{ Тл}; \quad B_{a2} = 1.15 \text{ Тл}$$

Коэффициент заполнения сталью $k_c = 0.95$

Допустимая ширина зубца [1, формула 6.64]:

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_2}{B_{z2} \cdot k_c} = \frac{0.848 \cdot 0.019}{1.75 \cdot 0.95} = 9.72 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$B_j = 0.54$ индукция ярма фазного ротора

Определим высоту ярма ротора [1, формула 6.102]:

$$h_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_j \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0.0092}{2 \cdot 0.54 \cdot 0.148 \cdot 0.95} = 0.06 \text{ м}$$

Внутренний диаметр сердечника ротора D_j при непосредственной посадке на вал равен диаметру вала D_B и может быть определен по [1, формула 6.101]:

$$D_B \approx k_B \cdot D_a = 0.23 \cdot 0.4 = 0.092 \text{ м};$$

(по [1, таблица 6.16] для $h=225$ мм и $2p=8$: $k_B=0.23$). Принимаем $D_j = D_B = 0.092$ м

Полная высота паза:

$$h_{n2} = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{j2} = \frac{0.291 - 0.092}{2} - 0.06 = 0.039 \text{ м}$$

Размеры паза рассчитаем исходя из условия постоянства ширины зубцов ротора [1, формулы 6.74, 6.75]:

$$\begin{aligned} b_{21} &= \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0.291 - 2 \cdot 0.0007) - 48 \cdot 9.72 \cdot 10^{-3}}{\pi + 48} = 0.0087 \text{ м} \\ b_{22} &= \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{n2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{Z_2 - \pi} = \\ &= \frac{\pi \cdot (0.291 - 2 \cdot 0.039) - 48 \cdot 9.72 \cdot 10^{-3}}{48 - \pi} = 0.0045 \text{ м} \end{aligned}$$

Расстояние между центрами паза ротора [1, формула 6.76]:

$$\begin{aligned} h_{21} &= h_{n2} - \left(\frac{b_{22}}{2} + h_{ш2} + \frac{b_{21}}{2} \right) = \\ &= 0.039 - \left(\frac{0.0045}{2} + 0.0007 + \frac{0.0087}{2} \right) = 0.0318 \text{ м} \end{aligned}$$

Размеры паза в свету с учетом припуска на сборку подставляем [1, формула 6.47]:

$$\begin{aligned} \Delta b_{п2} &= 0.2 \text{ мм}; \quad \Delta h_{п2} = 0.2 \text{ мм} \\ b'_{21} &= b_{21} - \Delta b_{п2} = 8.7 - 0.2 = 8.5 \text{ мм} \\ b'_{22} &= b_{22} - \Delta b_{п2} = 4.5 - 0.2 = 4.3 \text{ мм} \\ h'_{21} &= h_{21} - \Delta h_{п2} = 31.8 - 0.2 = 31.6 \text{ мм} \end{aligned}$$

Одностороннюю толщину изоляции в пазу найдем по [1, таблица 3.1]: $b_{из}=0.5$ мм

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу:

$$S_{из2} = b_{из2} \cdot \left(2 \cdot \left(h_{п2} - \frac{b'_{21} + b'_{22}}{2} \right) + \frac{\pi \cdot b'_{22}}{2} \right) =$$

$$= 0.5 \cdot \left(2 \cdot \left(39 - \frac{8.5 + 4.3}{2} \right) + \frac{\pi \cdot 2.74.3}{2} \right) = 25.991 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения оставшаяся для размещения проводников в обмотке подсчитаем:

$$S'_{п2} = \frac{\pi \cdot b'^2_{21}}{8} + \frac{(b'_{21} + b'_{22}) \cdot h'_{21}}{2} - S_{из2} =$$

$$= \frac{\pi \cdot 8.5^2}{8} + \frac{(8.5 + 4.3) \cdot 31.6}{2} - 25.444 = 193.99 \text{ мм}^2$$

Подсчитаем коэффициент заполнения паза [1, формула 3.2]:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot n_{эл} \cdot u_{п}}{S'_{п}} = \frac{1.405^2 \cdot 3 \cdot 24}{193.99} = 0.733$$

Коэффициент заполнения паза входит в область допустимых пределов $k_3=0.72...0.74$ для механизированной укладки обмотки двигателей $2p \geq 4$.

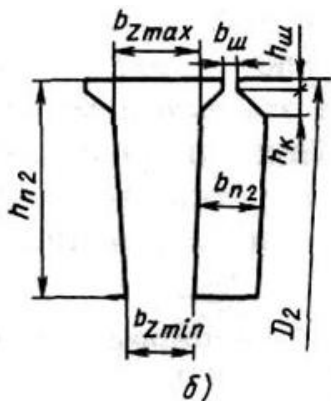


Рисунок 1.5. Паз ротора

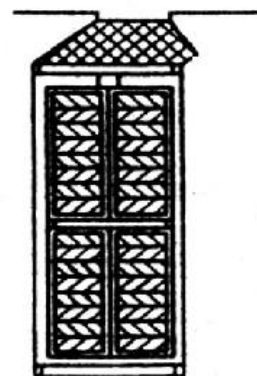


Рисунок 1.6. Паз ротора?
с заполнением

	Наименование	Материал
1	Клин пазовый	Стеклотекстолит СТЭФ – 1
2	Пазовая коробка	Стеклоткань ЛСК – 155/180
3	Обмоточный провод	ПЭТ 155

1.5. Расчет магнитной цепи

Электромагнитное поле электрической машины образуется за счет МДС обмоток статора и ротора, расположенных в пазах магнитопроводов. Неравномерность распределения проводников обмотки по объему машины, нелинейность магнитной характеристики и сложность конфигурации магнитопроводов, а также наличие воздушного промежутка между статором и ротором делают точный расчет поля в машине практически невозможным. Поэтому при проектировании машины пользуются рядом упрощающих допущений. Поле в машине подразделяют на главное поле и поле рассеяния. Магнитные линии главного поля замыкаются по магнитопроводам статора и ротора и пересекают воздушный зазор. Элементы магнитопроводов и зазоры, по которым проходит главным поток каждой пары полюсов, называют магнитной цепью.

Цель расчета магнитной цепи – определение МДС обмотки статора, способен создать в зазоре машины магнитный поток Φ_δ для наведения в обмотке статора заданного напряжения машины.

Магнитную цепь двигателя можно рассматривать как состоящую из пяти однородных участков, соединенных последовательно: воздушный зазор, зубцы статора, зубцы ротора, спинка статора и спинка ротора. Ход расчета заключается в определении для каждого участка его размеров и площади поперечного сечения, магнитной индукции, напряженности поля, расчетной средней длины магнитной силовой линии, магнитного напряжения участка. Затем рассчитывается суммарная МДС участка цепи и намагничивающий ток двигателя.

Индукцию в зубце статора [1, формула 6.104]:

$$B_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_1}{b_{z1} \cdot k_{c1}} = \frac{0.848 \cdot 0.012}{7.1 \cdot 10^{-3} \cdot 0.95} = 1.6 \text{ Тл}$$

Индукцию в зубце ротора [1, формула 6.104]:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2}{b_{z2} \cdot k_c} = \frac{0.848 \cdot 0.019}{9.7 \cdot 10^{-3} \cdot 0.95} = 1.75 \text{ Тл}$$

Индукцию в ярме статора [1, формула 6.105]:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0.0092}{2 \cdot 0.028 \cdot 0.148 \cdot 0.95} = 1.15 \text{ Тл}$$

Расчетная высота ярма ротора [1, формула 6.105]:

$$h'_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{0.291 - 0.092}{2} - 0.039 = 0.06 \text{ м}$$

Индукцию в ярме ротора [1, формула 6.107]:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_{\delta} \cdot k_c} = \frac{0.0092}{2 \cdot 0.06 \cdot 0.148 \cdot 0.95} = 0.54 \text{ Тл}$$

Магнитное напряжение воздушного зазора [1, формула 6.110]:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0.848 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 1.246 = 840.823 \text{ А}$$

Магнитная пропорциональность $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$

Коэффициент воздушного зазора [1, формула 4.17]:

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1.209 \cdot 1.03 = 1.246$$

Коэффициент воздушного зазора для статора [1, формула 4.14]:

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \cdot \delta} = \frac{0.012}{0.012 \cdot 4.416 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}} = 1.209$$

где по [1, формула 4.15]:

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш}/\delta)^2}{5 + b_{ш}/\delta} = \frac{(3.7 \cdot 10^{-3}/0.5 \cdot 10^{-3})^2}{5 + 3.7 \cdot 10^{-3}/0.5 \cdot 10^{-3}} = 4.416$$

Коэффициент воздушного зазора для ротора [1, формула 4.14]:

$$k_{\delta 2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \cdot \delta} = \frac{0.019}{0.019 \cdot 1.125 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3}} = 1.03$$

где по [1, формула 4.15]:

$$\gamma_2 = \frac{(b_{ш2}/\delta)^2}{5 + b_{ш2}/\delta} = \frac{(0.0015/0.5 \cdot 10^{-3})^2}{5 + 0.0015/0.5 \cdot 10^{-3}} = 1.125$$

Расчётная высота зубца статора и ротора

$$h_{z1} = h_n = 0.0257 \text{ м}$$

$$h_{z2} = h_{n2} - 0.1 \cdot b_{22} = 0.039 - 0.1 \cdot 0.0045 = 0.0387 \text{ м}$$

Напряженность зубцовой зоны статора и ротора [1, таблица П1.7]:

$$\begin{aligned} H_{z1} &= 850 \text{ Тл} & \text{для} & & B_{z1} &= 1.6 \text{ Тл} \\ H_{z2} &= 1330 \text{ Тл} & \text{для} & & B_{z2} &= 1.75 \text{ Тл} \end{aligned}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора [1, формула 6.111]:

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0.0257 \cdot 850 = 43.61 \text{ А}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора [1, формула 6.113]:

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0.0387 \cdot 1330 = 102.883 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны [1, формула 6.120]:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta} = 1 + \frac{43.61 + 102.883}{840.822} = 1.2$$

полученное значение коэффициента насыщения зубцовой зоны удовлетворяет требованиям (1.2-1.6).

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора по [1, формула 6.122]:

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.4 - 0.0283)}{2 \cdot 4} = 0.146 \text{ м}$$

Напряженность поля в ярме статора при индукции $B_a=1.15$ Тл находим по [1, таблица П1.6]: $H_a=241$ А/м.

Магнитное напряжение ярма статора [1, формула 6.121]:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.146 \cdot 241 = 35.173 \text{ А}$$

Высота спинки ротора [1, формула 6.125]:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{0.291 - 0.092}{2} - 0.0391 = 0.06 \text{ м}$$

Длина средней магнитной силовой линии в ярме ротора [1, формула 6.124]:

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_j + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.092 + 0.06)}{2 \cdot 4} = 0.0598 \text{ м}$$

Напряженность поля в ярме ротора при индукции $B_j=0.54$ Тл находим по [1, таблица П1.6]: $H_j=69$ А/м.

Магнитное напряжение ярма ротора [1, формула 6.123]:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.0598 \cdot 69 = 4.129 \text{ А}$$

Суммарное магнитное напряжение цепи (на пару полюсов) [1, формула 6.127]:

$$F_\Sigma = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j =$$

$$= 840.822 + 43.607 + 102.883 + 35.173 + 4.129 = 1026.614 \text{ A}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи двигателя [1, формула 6.128]:

$$k_{\mu} = \frac{F_{\mu}}{F_{\delta}} = \frac{1026.614}{840.822} = 1.2$$

Намагничивающий ток [1, формула 6.129]:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{\mu}}{0.9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{o61}} = \frac{4 \cdot 1026.614}{0.9 \cdot 3 \cdot 108 \cdot 0.959} = 14.67 \text{ A}$$

Намагничивающий ток в процентах или долях номинального тока двигателя [1, формула 6.130]:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1\text{ном}}} = \frac{14.67}{46.72} = 0.314$$

Относительное значение I_{μ}^* находится в допустимых пределах (0.3 – 0.4).

Значит, габариты двигателя выбраны, верно, и двигатель будет иметь неплохие КПД, $\cos \varphi$

1.6. Параметры рабочего режима

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивное сопротивления обмоток статора x_1 , r_1 , ротора r_2 , x_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление r_2 , введением которого учитывают влияние потерь в железе магнитопровода на характеристики двигателя.

Активные сопротивления обмоток:

Активное сопротивление обмоток зависят в общем случае от длины проводников обмотки и площади поперечного сечения проводников.

Средняя ширина катушки [1, формула 6.137]:

$$b_{\text{кт}1} = \frac{\pi \cdot (D + h_{\text{п}1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.292 + 0.0257)}{2 \cdot 4} = 0.124 \text{ м}$$

Вылет лобовых частей обмотки статора [1, формула 6.136]:

$$l_{\text{выл}1} = K_{\text{выл}} \cdot b_{\text{кт}1} + B = 0.5 \cdot 0.124 + 0.01 = 0.072 \text{ м}$$

по [1, таблица 9.23] находим коэффициент; $K_{\text{выл}}=0.5$.

$B=0.01$ м длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части

Длина лобовой части витка [1, формула 6.135]:

$$l_{л1} = K_{л} \cdot b_{кт1} + 2 \cdot B = 1.4 \cdot 0.124 + 2 \cdot 0.01 = 0.207 \text{ м}$$

где по [1, таблица 9.23] находим коэффициент: $K_{л}=1.4$.

Длина пазовой части равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_{п1} = l_{\delta} = 0.148 \text{ м}$$

Средняя длина витка обмотки [1, формула 6.134]:

$$l_{ср1} = 2 \cdot (l_{п1} + l_{л1}) = 2 \cdot (0.148 + 0.207) = 0.71 \text{ м}$$

Общая длина эффективных проводников фазы обмотки [1, формула 6.13]:

$$L_1 = w_1 \cdot l_{ср1} = 108 \cdot 0.71 = 76.72 \text{ м}$$

Для обмоток ротора и статора принимаем класс нагревостойкости F с температурой 75°C где $\rho_{115} = 10^{-6} / 41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - удельное сопротивление меди при температуре плюс 115°C ; тогда $\rho_{115} = 2,439 \cdot 10^{-8}$

Активное сопротивление обмотки статора [1, формула 6.131]:

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 2.439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{76.72}{3.681 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0.104 \text{ Ом}$$

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора

$$r'_1 = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U} = 0.104 \cdot \frac{46.72}{220} = 0.022 \text{ о. е.}$$

Средняя ширина катушки ротора [1, формула 6.137]:

$$b_{кт2} = \frac{\pi \cdot (D_2 + h_{п2})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0.291 + 0.039)}{2 \cdot 4} = 0.0989 \text{ м}$$

Вылет лобовых частей обмотки ротора [1, формула 6.136]:

$$l_{\text{выл2}} = K_{\text{выл}} \cdot b_{кт2} + B = 0.5 \cdot 0.0989 + 0.01 = 0.059 \text{ м}$$

Длина лобовой части витка ротора [1, формула 6.135]:

$$l_{л2} = K_{л} \cdot b_{кт2} + 2 \cdot B = 1.5 \cdot 0.0989 + 2 \cdot 0.01 = 0.168 \text{ м}$$

Длина пазовой части равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_{п2} = l_{\delta} = 0.148 \text{ м}$$

Средняя длина витка обмотки ротора [1, формула 6.134]:

$$l_{cp2} = 2 \cdot (l_{п2} + l_{л2}) = 2 \cdot (0.148 + 0.168) = 0.63 \text{ м}$$

Общая длина проводников фазы обмотки ротора [1, формула 6.133]:

$$L_2 = w_2 \cdot l_{cp2} = 96 \cdot 0.63 = 60.76 \text{ м}$$

Активное сопротивление обмотки ротора [1, формула 6.131]:

$$r_2 = \rho_{115} \cdot \frac{L_2}{q_{\text{эф}2} \cdot a_2} = 2.439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{60.76}{4.104 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0.181 \text{ Ом}$$

Для дальнейших расчетов активное сопротивление r_2 должно быть приведено к числу витков первичной обмотки [1, формула 6.149]:

$$r'_2 = v_{12} \cdot r_2 = 1.249 \cdot 0.181 = 0.225$$

где коэффициент приведения сопротивлений обмотки фазного ротора [1, формула 6.150]:

$$v_{12} = \frac{m_1 \cdot (w_1 \cdot k_{об1})}{m_2 \cdot (w_2 \cdot k_{об2})} = \frac{3 \cdot (108 \cdot 0.959)}{3 \cdot (96 \cdot 0.965)} = 1.249$$

Относительное значение активного сопротивления обмотки ротора

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U} = 0.224 \cdot \frac{46.724}{220} = 0.0479 \text{ о. е.}$$

Индуктивное сопротивления обмоток:

Индуктивное сопротивление обмоток электрических машин определяется их взаимной индуктивностью и собственное индуктивностью. Индуктивное сопротивление взаимной индукции является характеристикой главного поля машины. Индуктивные сопротивления самоиндукции характеризуют поля рассеяния.

Формулу для расчёта коэффициента магнитной проводимости пазового рассеяния фазных обмоток выбираем из [1, таблица 6.22]:

$$\begin{aligned} h_1 &= \frac{b - b_{ш}}{2} = \frac{0.058 - 0.0037}{2} = 1.05 \cdot 10^{-3} \text{ м} \\ \lambda_n &= \frac{h_3}{3 \cdot b} + \left(\frac{3 \cdot h_1}{b + 2 \cdot b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) = \\ &= \frac{0.0236}{3 \cdot 0.0058} + \left(\frac{3 \cdot 1.05 \cdot 10^{-3}}{0.0058 + 2 \cdot 0.0037} + \frac{0.001}{0.0037} \right) = 1.86 \end{aligned}$$

где $b = b_2 = 0.0058 \text{ м}$;

$h_3 = h_1 = 0.0236 \text{ м}$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, формула 6.154]:

$$\lambda_{\text{л}} = 0.34 \cdot \frac{q_1}{l_{\delta}} \cdot (l_{\text{л1}} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) =$$

$$= 0.34 \cdot \frac{3}{0.148} \cdot (0.207 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.115) = 0.921$$

Коэффициенты магнитной проводимости. Предварительно выбираем коэффициент $k_{\beta}=1$ т.к. обмотка выполнена без укорочения.

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1, формула 6.157]:

$$\lambda_{\text{д}} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{0.0127}{12 \cdot 0.0005 \cdot 1.246} \cdot 1.383 = 2.356$$

где по [1, формула 6.172]:

$$\xi = 2 \cdot k'_{\text{ск}} \cdot k_{\beta} - \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \cdot k_{\text{о61}}^2 \cdot (\beta_{\text{ск}}^2 + 1) =$$

$$= 2 \cdot 2.75 \cdot 1 + \left(\frac{0.019}{0.0127}\right)^2 \cdot 0.959^2 \cdot (1^2 + 1) = 1.383$$

пазы без скося $\beta_{\text{ск}}=1$, и отношение

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{0.019}{0.0127} = 1.4949; \quad k_{\text{ск}} = 2.75$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$x_1 = 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100}\right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q_1} \cdot (\lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{д}}) =$$

$$= 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{108}{100}\right)^2 \cdot \frac{0.148}{4 \cdot 3} \cdot (0.921 + 1.86 + 2.356) = 0.585 \text{ Ом}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления обмотки статора [1, формула 6.186]:

$$x_{1*} = x_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U} = 0.585 \cdot \frac{46.72}{220} = 0.124 \text{ о. е.}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния фазных роторов [1, таблица 6.22]:

$$\lambda_{\text{н2}} = \frac{h_{23}}{3 \cdot b_{21}} \cdot k_{\beta} + \left(0.785 - \frac{b_{\text{ш2}}}{2 \cdot b_{21}} + \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш2}}} + \frac{b_{\text{из}}}{b_{21}}\right) =$$

$$= \frac{0.0328}{3 \cdot 0.0087} \cdot 1 + \left(0.785 - \frac{0.0015}{2 \cdot 0.0087} + \frac{0.0007}{0.0015} + \frac{0.0004}{0.0087} \right) = 2.47$$

где

$$\begin{aligned} h_{23} &= h_{n2} - 2 \cdot b_{из} - \frac{b_{21}}{2} - h_{ш2} - 0.1 \cdot b_{22} = \\ &= 0.0391 - 2 \cdot 0.0004 - \frac{0.0087}{2} - 0.0007 - 0.1 \cdot 0.0045 = 0.0328 \text{ м} \end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, формула 6.154]:

$$\lambda_{л2} = 0.34 \cdot \frac{q_2 \cdot (l_{л2} - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau_2)}{l_2} = 0.34 \cdot \frac{2 \cdot (0.168 - 0.64 \cdot 1 \cdot 0.115)}{0.148} = 0.44$$

где полюсное деление ротора:

$$\tau_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0.291}{2 \cdot 4} = 0.115$$

Значение коэффициентов Δ_z и k'' находим по кривым [1, рисунки 6.39 а, 6.39 в] исходя из размерных соотношений:

$$\frac{b_{ш2}}{\delta} = \frac{0.0015}{0.0005} = 3 \quad \frac{b_{ш2}}{t_2} = \frac{0.0015}{0.019} = 0.1 \quad \text{тогда} \quad \Delta_z = 0.025 \quad k'' = 0.02$$

ξ_2 – коэффициент [1, формула 6.159]:

$$\begin{aligned} \xi_2 &= k'' \cdot q_2^2 + 2 \cdot k_\beta - k_{о62}^2 \cdot (1 + \Delta_z) = \\ &= 0.02 \cdot 2^2 + 2 \cdot 1 - 0.965^2 \cdot (1 + 0.025) = 1.12 \end{aligned}$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки фазного ротора [1, формула 6.157]:

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi_2 = \frac{0.019}{12 \cdot 0.0005 \cdot 1.246} \cdot 1.12 = 2.9$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$\begin{aligned} x_2 &= 15.8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \cdot \frac{l'_\delta}{p \cdot q_2} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}) = \\ &= 15.8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{98}{100} \right)^2 \cdot \frac{0.148}{4 \cdot 2} \cdot (2.47 + 2.9 + 0.44) = 0.815 \text{ Ом} \end{aligned}$$

Для дальнейших расчетов активное сопротивление x_2 должно быть приведено к числу витков первичной обмотки [1, формула 6.162]:

$$x'_2 = x_2 \cdot v_{12} = 0.815 \cdot 1.249 = 1.018 \text{ Ом}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления обмотки ротора

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{U} = 1.018 \cdot \frac{46.724}{220} = 0.21 \text{ о. е.}$$

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

1.7. Расчет потерь

При расчете электрической машины часть подводимой мощности расходуется на нагрев проводников, перемагничивание сердечника, создания необходимого для охлаждения потока воздуха, трение вращающихся частей о воздух, трение в подшипниках и т.д. эту часть мощности называют потерями, так как она теряется при электрическом преобразовании энергии. Потери в асинхронных машинах подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические потери в обмотках, вентиляционные, механические и добавочные потери при нагрузке. Основные потери в стали в асинхронных двигателях рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

Основные потери в стали (потери в стали основные) [1, формула 6.183]:

$$\begin{aligned} P_{ст.осн} &= p_{\frac{1.0}{50}} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^2 \cdot (k_{да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{дз} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) = \\ &= 2.5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^2 \cdot (1.4 \cdot 1.15^2 \cdot 36.316 + 1.7 \cdot 1.6^2 \cdot 14.412) = 324.914 \text{ Вт} \end{aligned}$$

из [1, таблица 6.24] для марки стали 2211 удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц: $p_{1.0/50}=2.5 \text{ Вт/кг}$;

$k_{да}$ и $k_{дз}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода

и технологических факторов, принимаем согласно рекомендациям [1, с. 206]:

$$k_{да}=1,4; k_{дз}=1.7$$

Масса стали ярма [1, формула 6.184]:

$$\begin{aligned} m_a &= \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = \\ &= \pi \cdot (0.4 - 0.0283) \cdot 0.0283 \cdot 0.148 \cdot 0.95 \cdot 7800 = 36.316 \text{ кг} \end{aligned}$$

где удельная масса стали [1, с. 206]: $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$

Масса стали зубцов статора [1, формула 6.185]:

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = \\ &= 0.0257 \cdot 0.0071 \cdot 72 \cdot 0.148 \cdot 0.95 \cdot 7800 = 14.412 \text{ кг} \end{aligned}$$

Частота вращения ротора равна:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{4} = 750 \text{ об/мин}$$

k_{01}, k_{02} - коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов на удельные потери [1, с. 207]: $k_{02} = 1$ $k_{01} = k_{02} = 1.7$

Амплитуда пульсаций индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора [1, формула 6.186]:

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0.22 \cdot 1.246 \cdot 0.848 = 0.2327 \text{ Тл}$$

Согласно рекомендациям по [1, рисунок 6.41], а для $b_{ш2}/\delta=0.0015/0.5 \cdot 10^{-3}=3$ находим $\beta_{02}=0.22$.

Амплитуда пульсаций индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов статора равна:

$$B_{01} = B_{02} = 0.2327 \text{ Тл}$$

Поверхностные потери в статоре, т.е. потери, приходящиеся на 1 м^2 поверхности головок зубцов [1, формула 6.187]:

$$\begin{aligned} p_{пов1} &= 0.5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{01} \cdot t_{z2} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 0.5 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{48 \cdot 750}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.2327 \cdot 0.019 \cdot 10^3)^2 = 114.0239 \text{ Вт/м}^2 \end{aligned}$$

где $k_{01}=1.7$ коэффициент учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов статора на удельные потери

Поверхностные потери в роторе, т.е. потери, приходящиеся на 1 м² поверхности головок зубцов [1, формула 6.188]:

$$p_{\text{пов2}} = 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_{z1} \cdot 10^3)^2 =$$

$$= 0.5 \cdot 1.7 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.2327 \cdot 0.0127 \cdot 10^3)^2 = 93.741 \text{ Вт/м}^2$$

где $k_{02}=1.7$ коэффициент учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери

Полные поверхностные потери в статоре [1, формула 6.189]:

$$P_{\text{пов1}} = p_{\text{пов1}} \cdot (t_{z1} - b_{ш1}) \cdot Z_1 \cdot l_{\delta} =$$

$$= 114.0239 \cdot (0.0127 - 3.7 \cdot 10^{-3}) \cdot 72 \cdot 0.148 = 10.99 \text{ Вт}$$

Полные поверхностные потери в роторе [1, формула 6.190]:

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

$$= 93.741 \cdot (0.019 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 48 \cdot 0.148 = 11.69 \text{ Вт}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора и статора.

Пульсация индукции в среднем сечении зубцов статора [1, формула 6.191]:

$$B_{\text{пул1}} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_1} \cdot B_{z1} = \frac{1.125 \cdot 0.0005}{2 \cdot 0.0127} \cdot 1.6 = 0.035 \text{ Тл}$$

Пульсация индукции в среднем сечении зубцов ротора [1, формула 6.192]:

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{z2} = \frac{4.416 \cdot 0.0005}{2 \cdot 0.019} \cdot 1.75 = 0.101 \text{ Тл}$$

Масса стали зубцов ротора [1, формула 6.197]:

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_{\delta} \cdot k_c \cdot \gamma_c =$$

$$= 48 \cdot 0.0387 \cdot 0.0097 \cdot 0.148 \cdot 0.95 \cdot 7800 = 19.8 \text{ кг}$$

Пульсационные потери в зубцах статора [1, формула 6.195]:

$$P_{\text{пул1}} \approx 0.11 \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пул1}} \right)^2 \cdot m_{z1} \approx$$

$$\approx 0.11 \cdot \left(\frac{48 \cdot 750}{1000} \cdot 0.035 \right)^2 \cdot 14.412 \approx 2.563 \text{ Вт}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора [1, формула 6.196]:

$$P_{\text{пул2}} \approx 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пул2}} \right)^2 \cdot m_{z2} \approx$$

$$\approx 0.11 \cdot \left(\frac{72 \cdot 750}{1000} \cdot 0.101 \right)^2 \cdot 19.8 \approx 65.36 \text{ Вт}$$

Добавочные потери в стали [1, формула 6.198]:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пул1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} =$$

$$= 10.99 + 2.563 + 11.69 + 65.36 = 90.604 \text{ Вт}$$

Полные потери в стали [1, формула 6.199]:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 324.913 + 90.604 = 415.517 \text{ Вт}$$

Механические потери для двигателей с внешним обдувом [1, формула 6.200]:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 0.78 \cdot \left(\frac{750}{10} \right)^2 \cdot 0.4^4 = 112.32 \text{ Вт}$$

для двигателей с $2p = 8$ коэффициент $K_T = 1.3 \cdot (1 - D_a) = 1.3 - (1 - 0.4) = 0.78$

Добавочные потери при номинальном режиме:

$$P_{\text{доб.ном.}} = 0.005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0.005 \cdot \frac{22000}{0.87} = 126.436 \text{ Вт}$$

Для проектируемого двигателя выбираем по [1, таблица П-35] щётки М20. Для них:

$J_{\text{щ}} = 12 \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$ допустимая плотность тока

$b_{\text{щ}} = 12.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ширина щётки

$h_{\text{щ}} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ высота щётки

$l_{\text{щ}} = 20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ длина щётки

$\Delta U_{\text{щ}} = 1.4 \text{ В}$ переходное падение напряжения на пару щеток при рекомендуемой плотности тока

$\rho_{\text{щ}} = 20 \cdot 10^4 \text{ Па}$ давление на контактной поверхности щеток

Площадь щеток на одно кольцо:

$$S_{\text{щ}} = \frac{I_{\text{щ}}}{J_{\text{щ}}} = \frac{43.797}{12 \cdot 10^4} = 0.3649 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

где $I_{\text{щ}} = I_2 = 43.797 \text{ А}$

число щеток на одно кольцо:

$$n_{\text{щ}} = \frac{S_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}} \cdot l_{\text{щ}}} = \frac{0.3649 \cdot 10^{-3}}{12.5 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 1.459$$

Принимаем $n_{\text{щ}} = 2$

Уточняем плотность тока под щеткой:

$$J_{\text{щ}} = \frac{I_{\text{щ}}}{b_{\text{щ}} \cdot l_{\text{щ}} \cdot n_{\text{щ}}} = \frac{43.797}{12.5 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 2} = 87596 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

Линейная скорость кольца (принимаем диаметр кольца $D_{\text{кл}} = 0.14 \text{ м}$):

$$v_{\text{к}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{кл}} \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0.14 \cdot 750}{60} = 5.497 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Общая площадь контактной поверхности всех щеток:

$$S_{\text{щ}} = b_{\text{щ}} \cdot l_{\text{щ}} \cdot n_{\text{щ}} \cdot m_1 = 12.5 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 3 = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$$

Потери на трение щеток о контактные кольца [1, формула 6.209]:

$$P_{\text{тр.щ}} = K_{\text{тр}} \cdot \rho_{\text{щ}} \cdot S_{\text{щ}} \cdot v_{\text{к}} = 0.16 \cdot 20000 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3} \cdot 5.497 = 62.149 \text{ Вт}$$

$K_{\text{тр}} = 0.16$ коэффициент трения щеток о контактные кольца

Потери холостого хода:

$$P_{\Sigma 0} = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ}} = 415.517 + 112.32 + 62.149 = 592.048 \text{ Вт}$$

1.8. Холостой ход

Электрические потери в стали про холостом ходу [1, формула 6.214]:

$$P_{\Sigma 1 \text{х.х}} = m_1 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 14.672^2 \cdot 0.254 = 164.153 \text{ Вт}$$

Реактивная составляющая тока Х.Х. принимается приближённо равной

$$I_{\text{х.х.р}} = I_{\mu} = 14.672 \text{ А}$$

Активная составляющая тока холостого хода [1, формула 6.213]:

$$I_{\text{х.х.а}} = \frac{P_{\Sigma 0} + P_{\Sigma 1 \text{х.х}}}{m_1 \cdot U} = \frac{415.517 + 164.153}{3 \cdot 220} = 1.145 \text{ А}$$

Ток холостого хода двигателя [1, формула 6.212]:

$$I_{\text{х.х}} = \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_{\text{х.х.р}}^2} = \sqrt{1.145^2 + 14.672^2} = 14.717 \text{ А}$$

Коэффициент мощности при холостом ходу [1, формула 6.215]:

$$\cos\varphi_{x,x} = \frac{I_{x,x.a}}{I_{x,x}} = \frac{1.145}{14.717} = 0.078$$

Определяем величину сопротивлений схемы замещения асинхронного двигателя [1, формула 6.179]:

$$r_{12} = \frac{P_{ст.очн}}{m_1 \cdot I_\mu^2} = \frac{324.913}{3 \cdot 14.672^2} = 0.503 \text{ Ом}$$

$$r_{12*} = \frac{r_{12} \cdot I_{1ном}}{U} = \frac{0.503 \cdot 46.72}{220} = 0.106 \text{ о. е.}$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора [1, формула 6.180]:

$$x_{12} = \frac{U}{I_\mu} - x_1 = \frac{220}{14.672} - 0.584 = 14.41 \text{ Ом}$$

$$x_{12*} = \frac{x_{12} \cdot I_{1ном}}{U} = \frac{14.41 \cdot 46.724}{220} = 3.06 \text{ о. е.}$$

Сопротивление обычно составляем $r_{12*}=0.05\dots0.2$; $x_{12*}=2\dots4$.

1.9. Расчет рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости $P_1, I_1, \cos\varphi, \eta, s=f(P_2)$.

Комплексный коэффициент [1, формула 6.218]:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0.584}{14.41} = 1.04$$

Коэффициенты для расчёта рабочих характеристик [1, формула 6.223]:

$$a' = c_1^2 = 1.04^2 = 1.082 \quad a = c_1 \cdot r_1 = 1.04 \cdot 0.254 = 0.264$$

$$b' = 0 \quad b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2') = 0.04 \cdot (0.584 + 1.04 \cdot 0.972) = 1.661$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода [1, формула 6.222]:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.очн} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1}{3 \cdot U} = \frac{324.913 + 3 \cdot 14.672^2 \cdot 0.254}{3 \cdot 220} = 0.741 \text{ А}$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{пост} = P_{ст} + P_{мех} + P_{тр.щ.} = 415.517 + 112.32 + 64.21 = 592.048 \text{ Вт}$$

Данные расчета рабочих характеристик для скольжения $s = 0.005, 0.01, 0.015, 0.02, 0.025, 0.03, 0.035, 0.04, 0.0479, 0.05$, $S_{ном}=0,0479$ сведены в таблицу 1.1.

Номинальные данные спроектированного двигателя: $P_2 = 22$ кВт; $U_1 = 220/380$ В; $2p = 8$; $\eta = 0,87$; $\cos \varphi = 0,82$.

Таблица 1.1. Расчет рабочих характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором

$$P_2 = 22 \text{ кВт}; U = 220/380 \text{ В}; 2p = 8; r_1 = 0.254 \text{ Ом};$$

$$r'_2 = 0.225 \text{ Ом}; P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{тр.щ}} = 592.048 \text{ Вт}; I_{0a} = 0.741 \text{ А};$$

$$I_{0p} = I_{\mu} = 14.672 \text{ А}; c_1 = 1.04; a' = 1.082; a = 0.264 \text{ Ом}; b' = 0; b = 1.661 \text{ Ом}$$

№ п/ п	Расчетная формула	Раз- мер- ность	Скольжение (s)									
			0.005	0.01	0.015	0.02	0.025	0.03	0.035	0.04	$s_{\text{ном}} =$ 0.0479	0.05
1	$a \cdot r'_2 / s$	Ом	48.855	24.427	16.285	12.213	9.771	8.142	6.979	6.106	5.098	4.885
2	$R = a + a \cdot r'_2 / s$	Ом	49.119	24.692	16.549	12.478	10.035	8.407	7.243	6.371	5.362	5.15
3	$X = b + b \cdot r'_2 / s$	Ом	1.661									
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	49.147	24.747	16.632	12.588	10.172	8.569	7.431	6.584	5.614	5.411
5	$I'_2 = U / Z$	А	4.476	8.889	13.226	17.476	21.627	25.672	29.602	33.412	39.187	40.6562
6	$\cos \varphi_2 = R / Z$	-	0.999	0.997	0.995	0.991	0.986	0.981	0.974	0.967	0.955	0.951
7	$\sin \varphi_2 = X / Z$	-	0.033	0.067	0.099	0.131	0.163	0.193	0.223	0.252	0.295	0.306
8	$I_{1a} = I_{0a} + I'_2 \cdot \cos \varphi_2$	А	5.214	9.61	13.901	18.064	22.078	25.926	29.594	33.073	38.174	39.434
9	$I_{1p} = I_{0p} + I'_2 \cdot \sin \varphi_2$	А	14.823	15.269	15.993	16.978	18.204	19.648	21.288	23.101	26.266	27.151
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	15.714	18.041	21.19	24.791	28.615	32.53	36.456	40.342	46.337	47.878

Продолжение таблицы 1.1

11	$\Gamma_2 = c_1 \cdot \Gamma_2$	A	4.657	9.25	13.763	18.185	22.505	26.713	30.803	34.768	40.777	42.305
12	$P_1 = 3 \cdot U \cdot I_{1a}$	BT	3441	6343	9175	11923	14572	17111	19533	21828	25195	26027
13	$P_{\text{э1}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1$	BT	188.29	248.20	342.40	468.63	624.28	806.92	1013.41	1240.98	1637.27	1747.91
14	$P_{\text{э2}} = 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2$	BT	14.683	57.9123	128.21	223.825	342.791	482.984	642.185	818.133	1125.38	1211.311
15	$P_{\text{э.щ}} = 3 \cdot \Delta U_{\text{щ}} \cdot I_2 \cdot V_i$	BT	21.422	42.543	63.301	83.638	103.506	122.861	141.671	159.905	187.542	194.571
16	$P_{\text{доб}} =$ $= P_{\text{доб.ном}} \cdot (I_1 / I_{1н})^2$	BT	17.208	31.715	45.876	59.613	72.859	85.557	97.662	109.141	125.974	130.134
17	$\Sigma P = P_{\text{пост}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} +$ $+ P_{\text{э.щ}} + P_{\text{доб}}$	BT	830.74	959.55	1151.96	1403.74	1710.15	2066.10	2466.29	2905.32	3666.59	3878.60
18	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	BT	2610	5383	8023	10519	12862	15045	17066	18923	21528	22148
19	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	-	0.7586	0.8487	0.8744	0.8823	0.8826	0.8793	0.8737	0.8669	0.8545	0.851
20	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	-	0.3318	0.5327	0.656	0.7287	0.7716	0.797	0.8118	0.8198	0.8238	0.8236

Рабочие характеристики спроектированного двигателя с фазным ротором
 ($P_2 = 22$ кВт; $U = 220/380$ В; $2p = 8$; $I_{\text{ном}} = 46.337$ А; $\eta_{\text{ном}} = 0.8545$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0.8238$)

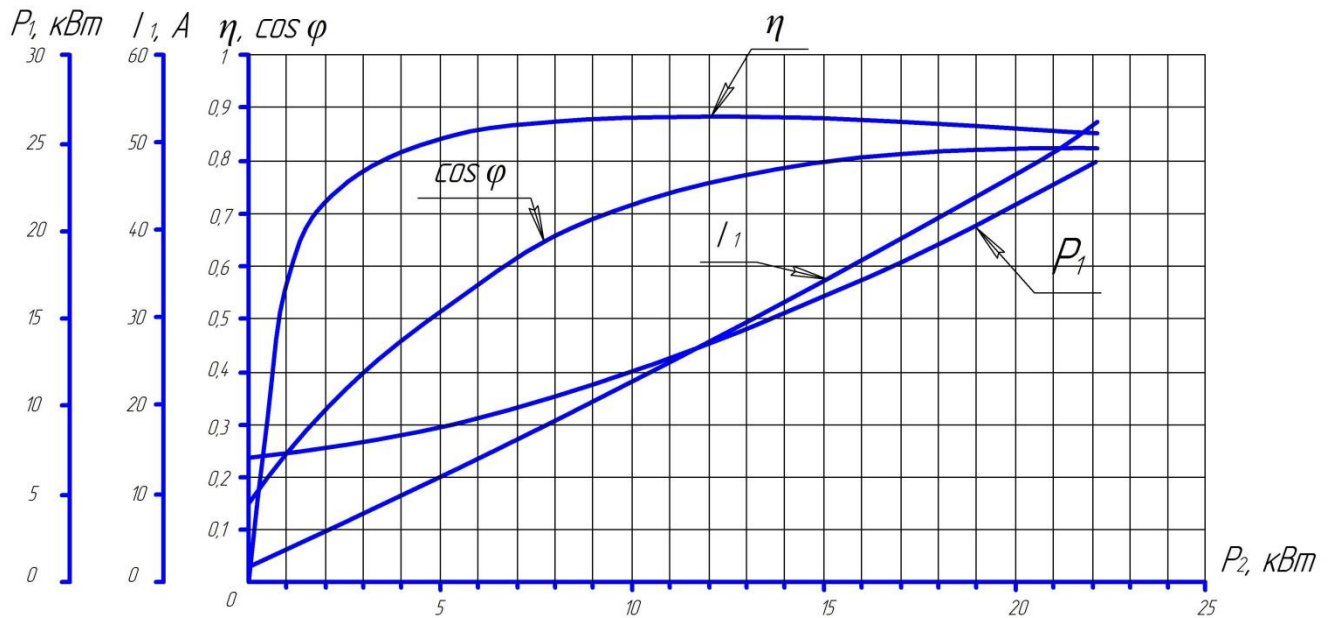


Рисунок 1.7. Рабочие характеристики

1.10. Расчет пусковых характеристик

Пусковые свойства асинхронных двигателей характеризуются начальным пусковым моментом $M_{\text{п}}^*$, начальным пусковым током $I_{\text{п}}^*$ и максимальным моментом M_{max}^* . В двигателях с фазным ротором начальный момент и пусковой ток определяются сопротивлением пускового реостата.

Рассчитаем точки характеристик соответствующие скольжениям:

$s = 1; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6; 0,5; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1$.

Расчет токов в обмотке ротора без учёта влияния эффекта вытеснения тока [1, формула 6.269]:

$$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}} =$$

$$= \frac{220}{\sqrt{(0.254 + 0.225/1)^2 + (0.584 + 0.972)}} = 135.049 \text{ A}$$

Ориентировочно для расчёта пусковых режимов принимают: $k_{\text{нас}} = 1.25 - 1.4$

Произведем подробный расчёт для $s = 1$ $k_{\text{нас}} = 1.35$

Определим среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора [1, формула 6.252]:

$$\begin{aligned} F_{\text{п.ср}} &= 0.7 \cdot \frac{k_{\text{нас}} \cdot I_1 \cdot u_{\text{н1}}}{a_1} \cdot \left(1 + k_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}\right) = \\ &= 0.7 \cdot \frac{1.35 \cdot 135.049 \cdot 18}{2} \cdot \left(1 + 0.959 \cdot \frac{72}{48}\right) = 2802.218 \text{ A} \end{aligned}$$

где I_1 – ток статора, соответствующий расчетному режиму, без учета насыщения:

$$I_1 = I'_2 = 135.049 \text{ A}$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре [1, формула 6.253]:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{2802.218 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 0.0005 \cdot 0.671} = 5.217 \text{ Тл}$$

где коэффициент [1, формула 6.254]:

$$C_N = 0.64 + 0.25 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_1 + t_2}} = 0.64 + 0.25 \cdot \sqrt{\frac{0.0005}{0.0127 + 0.19}} = 0.671$$

По полученному значению индукции определяем отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризующее коэффициентом X_δ , значение которого находят по кривой [1, рисунок 6.50]: $X_\delta = 0.466$.

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов статора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов по (6.255)

$$C_1 = (t_1 - b_{\text{ш1}}) \cdot (1 - \chi_\delta) = (0.012 - 0.0037) \cdot (1 - 0.466) = 0.0048$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния [1, формула 6.258]:

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_{ш1} + 0.58 \cdot h'}{b_{ш1}} \cdot \frac{C_1}{C_1 + 1.5 \cdot b_{ш1}} =$$

$$= \frac{0.001 + 0.58 \cdot 0.0236}{0.0037} \cdot \frac{0.0048}{0.0048 + 1.5 \cdot 0.0037} = 1.846$$

где $h' = h_n - h_1 - h_{ш} = 0.0257 - 0.0011 - 0.001 = 0.236$ м

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора [1, формула 6.261]:

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 1.864 - 1.846 = 0.017$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, формула 6.263]:

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot \chi_\delta = 2.356 \cdot 0.466 = 1.097$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, формула 6.264]:

$$x_{1нас} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}} = 0.5846 \cdot \frac{0.017 + 1.097 + 0.921}{1.864 + 2.356 + 0.921} = 0.231 \text{ Ом}$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов ротора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов [1, формула 6.255]:

$$C_2 = (t_2 - b_{ш2}) \cdot (1 - \chi_\delta) = (0.019 - 0.0015) \cdot (1 - 0.466) = 0.0094$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения [1, формула 6.260]:

$$\Delta\lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш1}} \cdot \frac{C_2}{C_2 + b_{ш2}} = \frac{0.0007}{0.0015} \cdot \frac{0.0094}{0.0092 + 0.0015} = 0.402$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для ротора [1, формула 6.262]:

$$\lambda_{п2нас} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2нас} = 2.474 - 0.402 = 2.0723$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, формула 6.263]:

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot \chi_{\delta} = 2.861 \cdot 0.466 = 1.333$$

Приведённое индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1, формула 6.265]:

$$x'_{2нас} = x'_{2} \cdot \frac{\lambda_{п2нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}} = 0.972 \cdot \frac{0.402 + 1.333 + 0.437}{2.474 + 2.861 + 0.437} = 0.647 \text{ Ом}$$

Уточним коэффициент [1, формула 6.267]:

$$c_{1пнас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12п}} = 1 + \frac{0.2316}{17.5936} = 1.0132$$

где по [1, формула 6.266]:

$$x_{12п} = x_{12} \cdot \frac{F_{ц}}{F_{\delta}} = 14.409 \cdot \frac{1026.614}{840.822} = 17.5936$$

Найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1, формула 6.268]:

$$a_{п} = r_1 + c_{1пнас} \cdot \frac{r'_2}{s} = 0.2542 + 1.0132 \cdot \frac{0.2256}{1} = 0.4827 \text{ Ом}$$

$$b_{п} = x_1 + c_{1пнас} \cdot x'_{2нас} = 0.5846 + 1.0132 \cdot 0.647 = 1.2402 \text{ Ом}$$

Ток в обмотке ротора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1, формула 6.269]:

$$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{a_{п}^2 + b_{п}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0.4827^2 + 1.2402^2}} = 165.3047 \text{ А}$$

Ток в обмотке статора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения по [1, формула 6.271]:

$$\begin{aligned} I_1 &= I'_2 \cdot \frac{\sqrt{a_{п}^2 + (b_{п}^2 + x_{12п})^2}}{c_{1пнас} \cdot x_{12п}} = \\ &= 161.0861 \cdot \frac{\sqrt{0.4827^2 + (1.2402 + 17.1936)^2}}{1.0132 \cdot 17.5936} = 174.7163 \text{ А} \end{aligned}$$

Определим кратность тока и момента при заданном $s = 1$

$$I_{no} = \frac{I_1}{I_{1н}} = \frac{174.7163}{46.337} = 3.7793$$

$$M_{no} = \left(\frac{I'_2}{I_{1H}} \right)^2 \cdot \frac{s_H}{s} = \left(\frac{165.3047}{46.337} \right)^2 \cdot \frac{0.0479}{1} = 0.60$$

Критическое скольжение определяем после расчёта всех точек пусковых характеристик по (6.272)

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{x_{1нас}/c_{1нас} + x'_{2нас}} = \frac{0.2256}{0.2316/1.0132 + 0.1471} = 0.2576$$

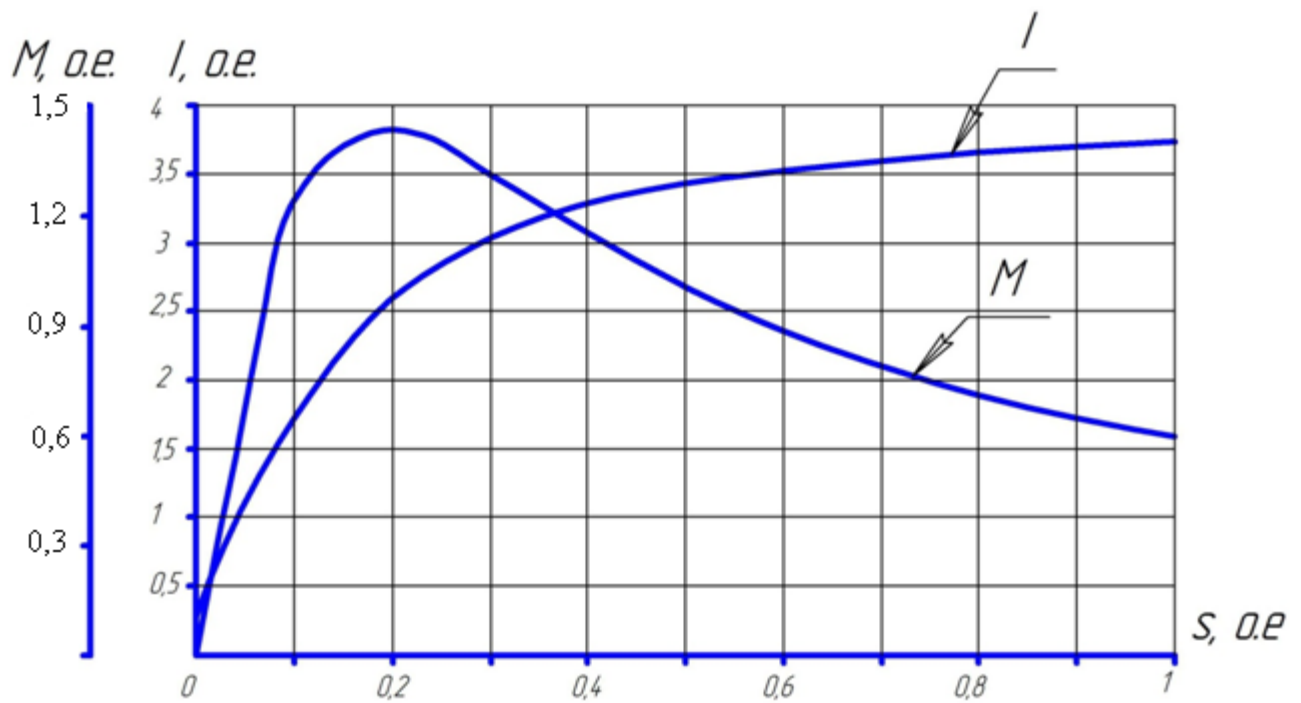


Рисунок 1.8. Пусковые характеристики

Таблица 1.2. Расчет пусковых характеристик асинхронного двигателя с фазным ротором

№	Расчетная формула	Единица	Скольжение									
			1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
1	$k_{\text{нас}}$	-	1.35	1.34	1.33	1.32	1.31	1.3	1.29	1.28	1.27	1.26
2	$F_{\text{п.ср}} = 0.7 \cdot \frac{k_{\text{нас}} \cdot I_1 \cdot u_{\text{н1}}}{a_1} \cdot \left(1 + k_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}\right)$	А	2802.21	2768.61	2731.37	2688.70	2637.49	2571.97	2480.27	2334.98	2062.8	14442.4
3	$B_{\phi\delta} = \frac{F_{\text{п.ср}} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	5.217	5.154	5.085	5.006	4.910	4.788	4.618	4.347	3.840	2.685
4	χ_{δ}		0.466	0.476	0.485	0.495	0.505	0.515	0.520	0.548	0.604	0.776
5	$C_1 = (t_1 - b_{\text{ш1}}) \cdot (1 - \chi_{\delta})$	$\frac{\text{М}}{\text{М}}$	0.0048	0.0047	0.0047	0.0046	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0036	0.002
6	$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1нас}}$	-	1.8466	1.8279	1.8108	1.7915	1.7719	1.7519	1.7418	1.6832	1.5565	1.0612
7	$\lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot \chi_{\delta} =$	-	1.0979	1.1214	1.1426	1.662	1.1898	1.2133	1.2251	1.2911	1.423	1.8282

8	$x_{1\text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{п1\text{нас}} + \lambda_{д1\text{нас}} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}}$	О М	0.2316	0.2364	0.2407	0.2456	0.2505	0.2554	0.2579	0.2721	0.3015	0.4039
9	$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}}}{x_{12\text{п}}}$	-	1.0132	1.0134	1.0137	1.014	1.0142	1.0145	1.0147	1.0155	1.0171	1.023
10	$C_2 = (t_2 - b_{ш2}) \cdot (1 - \chi_\delta)$	М М	0.0094	0.0092	0.009	0.0089	0.0087	0.0085	0.0084	0.0079	0.0069	0.0039
11	$\lambda_{п2\text{нас}} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\text{нас}}$	-	2.0723	2.0734	2.0744	2.0755	2.0767	2.0779	2.0785	2.0822	2.0908	2.1368
12	$\lambda_{д2\text{нас}} = \lambda_{д2} \cdot \chi_\delta$	-	1.3335	1.3621	1.3879	1.4165	1.4451	1.4737	1.488	1.5682	1.7184	2.2206
13	$x'_{2\text{нас}} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\text{нас}} + \lambda_{д2\text{нас}} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}}$	О М	0.6472	0.6522	0.6567	0.6617	0.667	0.6717	0.6742	0.6883	0.7168	0.8074
14	$a_{п} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r'_2}{s}$	О М	0.4827	0.5082	0.54	0.581	0.6355	0.7119	0.8264	1.0178	1.4015	2.562
15	$b_{п} = x_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot x'_{2\text{нас}}$	О М	1.2402	1.2455	1.2502	1.2555	1.2607	1.266	1.2687	1.2835	1.3136	1.4105
16	$I'_2 = \frac{U}{\sqrt{a_{п}^2 + b_{п}^2}}$	A	165.304	163.547	161.544	159.032	155.823	151.467	145.467	134.3	114.53	75.224

17	$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{a_{\pi}^2 + (b_{\pi}^2 + x_{12\pi})^2}}{c_{1\pi\text{нас}} \cdot x_{12\pi}}$	A	174.716	172.866	170.758	168.115	164.115	160.157	153.674	142.111	121.34	80.15
18	$I_{\text{no}} = \frac{I_1}{I_{1\text{H}}}$		3.7393	3.699	3.654	3.598	3.525	3.427	3.288	3.041	2.596	1.715
19	$M_{\text{no}} = \left(\frac{I'_2}{I_{1\text{H}}}\right)^2 \cdot \frac{s_{\text{H}}}{s}$		0.0998	0.1086	0.1192	0.132	0.1478	0.1676	0.1928	0.2196	0.2396	0.2067

2. Тепловой расчет

Электромеханические преобразователи энергии в электрических машинах сопровождаются преобразованием электрической или механической энергии в тепло. Тепло, выделяемое на элементах машин при ее работе, может вызвать недопустимое повышение температуры активных и конструктивных элементов машины, снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток, уменьшение времени безотказной работы машины. Поэтому определение тепловых потоков, расчет изменения температуры является важными разделами проектирования электрической машины. На основе этого расчета оценивается тепловое состояние машины, выбираются такие тепловые и вентиляционные схемы и способы ее охлаждения, при которых превышение температуры частей электрической машины не превосходит пределов допустимых значений, установленных ГОСТ 183-74.

Допустимая предельная температура определяется классом нагревостойкости изоляции обмоток. Основными источниками выделения тепла в электрической машине является обмотка, элементы магнитопровода и конструктивные элементы, в которых возникают потери от перемагничивания. Тепло выделяется и в скользящем контакте. Механические потери, в том числе и вентиляционные, также увеличивают нагрев машины.

На пути движения тепловых потоков от источников тепла происходит перепад температуры в активных частях машины, в изоляции и между охлаждающими поверхностями и охлаждающей средой. В тепловом расчете электрической машины ставится задача определить все внутренние перепады и превышения температуры внешней поверхности охлаждаемых частей над температурой окружающей среды. Исходными данными при тепловом расчете являются следующие: распределение потерь энергии в элементах двигателя, значение физических постоянных – теплопроводности, теплоемкости и др.

В современной практике проектирования и исследования асинхронных двигателей применяются следующие методы тепловых расчетов: упрощение

методики, аналитический метод или метод температурного поля, метод эквивалентных тепловых схем, метод эквивалентных греющих потерь.

Для асинхронного двигателя с фазным ротором, упрощенные методики теплового расчета отсутствуют. Для теплового расчета спроектированного двигателя воспользуемся методом эквивалентных тепловых схем.

2.1. Исходные данные к тепловому расчету

Потребляемая мощность:	$P_{2H}=22 \cdot 10^3 \text{ Вт}$
Число фаз:	$m=3$
Номинальная частота вращения ротора:	$n_H=750 \text{ об/мин}$
Число пар полюсов:	$2p=8, p=4$
Внешний диаметр магнитопровода статора:	$D_a=0,4 \text{ м}$
Внутренний диаметр магнитопровода статора:	$D=0,292 \text{ м}$
Длина пакета статора:	$l_1=0,148 \text{ м}$
Внешний диаметр магнитопровода ротора:	$D_2=0,291 \text{ м}$
Диаметр вентилятора:	$D_B=0,416 \text{ м}$
Длина пакета ротора:	$l_2=0,148 \text{ м}$
Длина воздушного зазора:	$\delta=0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Число зубцов статора:	$Z_1=72$
Размеры зубца статора:	$b_{z1}=7,112 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $h_{z1}=25,651 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Размеры паза статора:	$b_{п11}=7,867 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $b_{п12}=5,808 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $h_{п1}=25,651 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Число зубцов ротора:	$Z_2=48$
Размеры зубцов ротора:	$b_{z2}=9,72 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ $h_{z2}=38,678 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Размеры паза ротора:	$b_{п21}=8,666 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

	$b_{п22}=4,498 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
	$h_{п2}=31,846 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Число эффективных проводников в пазу статора:	$N_1=10$
Число эффективных проводников в пазу ротора:	$N_2=24$
Число элементарных проводников в пазу статора:	$n_{эл1}=3$
Число элементарных проводников в пазу ротора:	$n_{эл2}=3$
Размеры проводников в пазу статора:	$d_{из1}=1,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
	$d_{эл1гол}=1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Размеры проводников в пазу ротора:	$d_{из2}=1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
	$d_{эл2гол}=1,32 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Размеры пазовой изоляции статора:	$b_{ип1}=0,58 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
	$h_{кл1}=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Размеры пазовой изоляции ротора:	$b_{ип2}=0,58 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
	$h_{кл2}=1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Размеры лобовой части статора:	$l_{л1}=207 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
	$h_{л1}=h_{п1}+4,5 \cdot \Delta_{ип1}$
Размеры лобовой части ротора:	$l_{л2}=168 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
	$h_{л2}=h_{п2}+4,5 \cdot \Delta_{ип2}$
Размеры вылета лобовой части статора:	$l_{выл1}=72 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Размеры вылета лобовой части ротора:	$l_{выл2}=59 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Высота ярма статора:	$h_{j1}=28,348 \cdot 10^{-3} \text{ м}$
Глубина внутренней полости подшипниковых щитов:	$h_{щ}=0,014 \text{ м}$
Номинальный продолжительный ток обмотки статора:	$I_{1н}=46,724 \text{ А}$
Номинальный продолжительный ток обмотки ротора:	$I_{2н}=43,797 \text{ А}$
Потери мощности в стали:	$P_{ст}=415,517 \text{ Вт}$
Механические потери мощности:	$P_{мех}=112,32 \text{ Вт}$
Активное сопротивление обмотки статора:	$r_1=0,254 \text{ Ом}$
Активное сопротивление обмотки ротора:	$r_2=0,18 \text{ Ом}$
Индуктивное сопротивление обмотки статора:	$x_1=0,017 \text{ Ом}$
Индуктивное сопротивление обмотки ротора:	$x_2=0,103 \text{ Ом}$

Диаметр кожуха:	$D_k=0,470 \text{ м}$
Диаметр вала под пакетом ротора:	$D_{\text{вал}}=0,092 \text{ м}$
Длина станины:	$L_{\text{ст}}=0,5 \text{ м}$
Наружный диаметр станины:	$D_{\text{ст}}=0,420 \text{ м}$
Длина ребра:	$L_p=0,480 \text{ м}$
Высота ребра:	$h_p=0,045 \text{ м}$
Ширина ребра у основания:	$b_{po}=0,010 \text{ м}$
Ширина ребра у вершины:	$b_{po}=0,007 \text{ м}$
Температура окружающей среды:	$\theta_0=25 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Коэффициент добавочных потерь:	$k_d=4$

За основу берем методику теплового расчета принятую в [4], согласно которой статорная обмотка подразделяется на три тела 1, 2, 3. Поскольку ротор имеет разную изоляционную обмотку, ротор подразделяется на три тела 5, 6, 7. В упрощенной схеме (рисунок 2.1.) сердечник статора рассматривается, как тело, также как и сердечник ротора.

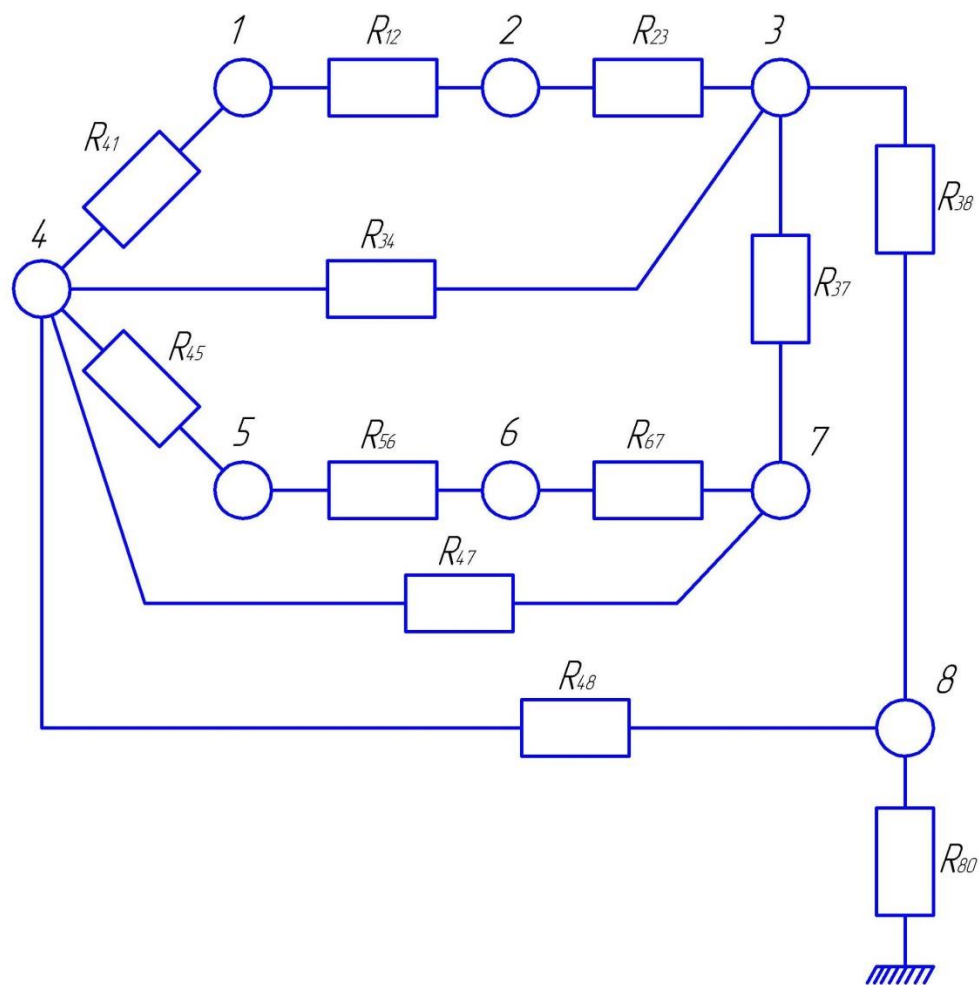


Рисунок 2.1. Тепловая схема асинхронного двигателя с фазным ротором

1 – лобовая часть обмотки статора

2 – пазовая часть обмотки статора

3 – сердечник статора

4 – внутренний воздух

5 – лобовая часть обмотки ротора

6 – пазовая часть обмотки ротора

7 – сердечник ротора

8 – станина и подшипниковые щиты

R_{12} – сопротивление между лобовой и пазовой частями обмоток статора

R_{23} – сопротивление между пазовой частями и сердечником статора

R_{41} – сопротивление между внутренним воздухом и лобовой частью обмотки статора

R_{45} – сопротивление между внутренним воздухом и лобовой частью обмотки ротора

R_{56} – сопротивление между лобовой частью и сердечником ротора

R_{67} – сопротивление между пазовой частью и сердечником ротора

R_{37} – сопротивление между сердечниками статора и ротора

R_{38} – сопротивление между сердечником статора, станиной и подшипниковыми щитами

R_{80} – сопротивление между станиной, подшипниковыми щитами и станиной

2.2. Расчет мощности источников теплоты

Удельное сопротивление обмоток статора:

$$\rho_{1\text{сопр}} = \frac{r_1}{x_1 + x_\mu} = \frac{0.254}{0.017 + 14.409} = 0.017 \text{ Ом}$$

Удельное сопротивление обмотки ротора:

$$\rho_{2\text{сопр}} = \frac{r_2}{x_2 + x_\mu} = \frac{0.18}{0.103 + 14.409} = 0.012 \text{ Ом}$$

Потери мощности в обмотке статора:

$$\begin{aligned} P_{\text{эл1}} &= m \cdot I_{1\text{н}}^2 \cdot r_1 \cdot (1 - \rho_{1\text{сопр}}) = 3 \cdot 46.724^2 \cdot 0.254 \cdot (1 - 0.017) \\ &= 1635.384 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Потери мощности в обмотке ротора:

$$P_{\text{эл2}} = m \cdot I_{2\text{н}}^2 \cdot r_2 \cdot (1 - \rho_{2\text{сопр}}) = 3 \cdot 43.797^2 \cdot 0.18 \cdot (1 - 0.012) = 1026.018 \text{ Вт}$$

Добавочные потери:

$$P_{\text{доб}} = P_{2\text{н}} \cdot 0.005 = 22 \cdot 10^3 \cdot 0.005 = 110 \text{ Вт}$$

Потери мощности в лобовых частях обмотки статора:

$$P_1 = \frac{P_{\text{эл1}} \cdot l_{\text{л1}}}{l_1 + l_{\text{л1}}} = \frac{1635.384 \cdot 0.207}{0.148 + 0.207} = 953.613 \text{ Вт}$$

Потери мощности в пазовых частях обмотки статора:

$$P_2 = P_{\text{эл1}} - P_1 = 1635.384 - 953.613 = 681.77 \text{ Вт}$$

Потери мощности сердечнике статора:

$$P_3 = P_{ст} + 0.5 \cdot k_d \cdot P_{доб} = 415.517 + 0.5 \cdot 4 \cdot 110 = 527.517 \text{ Вт}$$

Потери мощности на вентиляцию:

$$P_4 = P_{мех}/4 = 112.32/4 = 28.08 \text{ Вт}$$

Потери мощности в лобовых частях обмотки ротора:

$$P_5 = \frac{P_{эл2} \cdot l_{л2}}{l_2 + l_{л2}} = \frac{1026.018 \cdot 0.168}{0.148 + 0.168} = 545.909 \text{ Вт}$$

Потери мощности в пазовых частях обмотки ротора:

$$P_6 = \frac{P_{эл2} \cdot l_2}{l_2 + l_{л2}} = \frac{1026.018 \cdot 0.148}{0.148 + 0.168} = 480.108 \text{ Вт}$$

Потери мощности в сердечнике ротора:

$$P_7 = 0.5 \cdot k_d \cdot P_{доб} = 0.5 \cdot 4 \cdot 110 = 220 \text{ Вт}$$

Мощность, выделяющаяся на корпусе двигателя в виде тепла:

$$P_8 = P_4 = 28.08 \text{ Вт}$$

Суммарная мощность, выделяющая в двигателе в виде тепла:

$$\begin{aligned} \Sigma P &= P_{эл1} + P_{эл2} + P_{ст} + P_{мех} + P_{доб} \cdot k_d = \\ &= 1635.384 + 1026.018 + 415.517 + 112.32 + 110 \cdot 4 = 3629.239 \text{ Вт} \end{aligned}$$

Мощность, выделяющаяся в двигателе в виде тепла без учета потерь на трение:

$$\Sigma P_i = \Sigma P - 0.5 \cdot P_{мех} = 3629.2396 - 0.5 \cdot 112.32 = 3573.079 \text{ Вт}$$

2.3. Расчет теплоотдачи корпуса и его температуры

Окружная скорость вентилятора:

$$\vartheta_B = \frac{\pi \cdot D_B \cdot n_H}{60} = \frac{\pi \cdot 0.416 \cdot 750}{60} = 16.336 \text{ м/с}$$

Средняя скорость воздушного потока при входе в вентиляционные каналы:

$$\omega_p = 0.45 \cdot \vartheta_B = 0.45 \cdot 16.336 = 7.351 \text{ м/с}$$

Приближенное значение расхода воздуха в системе внешнего обдува:

$$Q_B = \omega_p \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_K^2 + D_{ст}^2) = 7.351 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (0.470^2 + 0.420^2) = 2.293 \text{ м}^3/\text{с}$$

Подогрев воздуха при внешнем обдуве:

$$\Delta\theta_B = \frac{0.7 \cdot \Sigma P}{1100 \cdot Q_B} = \frac{0.7 \cdot 3629.239}{1100 \cdot 2.293} = 1.006 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Эффективная скорость обдува станины на входном участке пути потока:

$$\omega_{\text{эф}} = \sqrt{(0.5 \cdot \vartheta_B)^2 + \omega_p^2} = \sqrt{(0.5 \cdot 16.336)^2 + 7.351^2} = 10.989 \text{ м/с}$$

Количество горизонтальных ребер на станине: $N_p = 16$

Размеры межреберного канала:

$$b_{K1} = 0.026 \text{ м}, \quad b_{K2} = 0.03 \text{ м}$$

$$d_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot (b_{K1} + b_{K2}) \cdot h_p}{2 \cdot h_p + b_{K1}} = \frac{2 \cdot (0.026 + 0.03) \cdot 0.045}{2 \cdot 0.045 + 0.026} = 0.0434 \text{ м}$$

Средняя расчетная температура охлаждающего потока:

$$\theta_m = \theta_0 + 0.5 \cdot \Delta\theta_B = 25 + 0.5 \cdot 1.006 = 25.503 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Кинематическая вязкость воздуха при 30 °C: $\nu = 15.54 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Коэффициент теплопроводимости: $\lambda = 2.63 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$

Число Рейнольдса:

$$Re_{\text{эф}} = \frac{\omega_{\text{эф}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu} = \frac{10.989 \cdot 0.0434}{15.54 \cdot 10^{-6}} = 3.072 \cdot 10^{-4}$$

Число Нуссельта:

$$Nu_{BX} = 0.626 \cdot Re_{\text{эф}}^{0.522} = 0.626 \cdot (3.072 \cdot 10^{-4})^{0.522} = 137.733 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

Коэффициент уменьшения КТО по длине станины при отношении диаметров

$D_{\text{ст}}/d_{\text{экв}} = 9.666$ принимаем по рисунку 10.11 [4, с. 193] $\gamma = 0.07$

Средний КТО станины:

$$a_{\text{ст}} = \frac{a_{BX} \cdot d_{\text{экв}} \cdot \left(1 - e^{\frac{-\gamma \cdot L_{\text{ст}}}{d_{\text{экв}}}}\right)}{\gamma \cdot L_{\text{ст}}} =$$

$$= \frac{83.372 \cdot 0.0434 \cdot \left(1 - e^{\frac{-0.07 \cdot 0.5}{0.0434}}\right)}{0.07 \cdot 0.5} = 57.25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

Коэффициент теплоотдачи подшипниковых щитов со стороны вентилятора и контактных щеток:

$$a_{\text{щ1}} = \theta_0 + 14.3 \cdot \vartheta_B^{0.6} = 25 + 14.3 \cdot 16.336^{0.6} = 101.423 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$$

$$a_{\text{щ}2} = \theta_0 + 2.6 \cdot \vartheta_{\text{в}}^{0.9} = 25 + 2.6 \cdot 16.336^{0.9} = 57.122 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$$

Поверхность охлаждения станины без ребер:

$$S_{\text{гл}} = \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot L_{\text{ст}} = \pi \cdot 0.42 \cdot 0.5 = 0.659 \text{ м}^2$$

Поверхность ребер:

$$S_{\text{р}} = 2 \cdot N_{\text{р}} \cdot h_{\text{р}} \cdot L_{\text{р}} = 2 \cdot 16 \cdot 0.045 \cdot 0.480 = 0.691 \text{ м}^2$$

Средняя толщина трапециевидного ребра:

$$b_{\text{р}} = \frac{b_{\text{ро}} + b_{\text{рв}}}{2} = \frac{0.010 + 0.007}{2} = 0.0085 \text{ м}^2$$

Температурный коэффициент рассеяния для чугуна: $\lambda_{\text{ст}} = 47 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Коэффициент поля:

$$m_{\text{р}} = h_{\text{р}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a_{\text{ст}}}{b_{\text{р}} \cdot \lambda_{\text{ст}}}} = 0.045 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 57.25}{0.0085 \cdot 47}} = 0.761$$

$$m_{0\text{р}} = h_{\text{р}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot a_{\text{ст}}}{b_{\text{ро}} \cdot \lambda_{\text{ст}}}} = 0.045 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 57.25}{0.001 \cdot 47}} = 0.761$$

Согласно рекомендациям [4] принимаем поправку к определению коэффициента эффективности трапециевидных ребер: $\Delta k_{\text{эф}} = 0.018$

Коэффициента эффективности трапециевидных ребер:

$$K_{\text{эф}} = \frac{1}{mh} \cdot \left(1 - \frac{2}{e^{2mh} + 1}\right) + \Delta k_{\text{эф}} = \frac{1}{0.761} \cdot \left(1 - \frac{2}{e^{2 \cdot 0.761} + 1}\right) + 0.018 = 0.86$$

Площадь поверхности подшипникового щита:

$$\begin{aligned} S_{\text{щ}} &= \pi \cdot D_{\text{ст}} \cdot (0.25 \cdot D_{\text{ст}} + 0.8 \cdot h_{\text{щ}}) = \\ &= \pi \cdot 0.42 \cdot (0.25 \cdot 0.42 + 0.8 \cdot 0.016) = 0.155 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Общее тепловое сопротивление от корпуса к охлаждающему потоку:

$$\begin{aligned} R_{80} &= \frac{1}{(S_{\text{гл}} + K_{\text{эф}} \cdot S_{\text{р}}) \cdot a_{\text{ст}} + S_{\text{щ}} \cdot (a_{\text{щ}1} + a_{\text{щ}2})} = \\ &= \frac{1}{(0.659 + 0.86 \cdot 0.691) \cdot 57.25 + 0.155 \cdot (101.423 + 57.122)} = 0.01 \text{ К/Вт} \end{aligned}$$

Среднее превышение температуры охлаждающего воздушного потока над температурой окружающей среды:

$$\Delta\theta_0 = 0.7 \cdot \frac{\Sigma P}{2 \cdot 1100 \cdot Q_B} = 0.7 \cdot \frac{3629.239}{2 \cdot 1100 \cdot 2.293} = 0.503 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Превышение температуры корпуса:

$$\Delta\theta_8 = R_{80} \cdot \Sigma P_i + \Delta\theta_0 = 0.01 \cdot 3629.239 + 0.503 = 38.119 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

2.4. Расчет внутренних тепловых сопротивлений схемы

Площадь поперечного сечения проводников обмоток статора:

$$S_{M1} = Z_1 \cdot N_1 \cdot n_{эл1} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{эл1\text{гол}}^2 = 72 \cdot 10 \cdot 3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1.25 \cdot 10^{-3})^2 = 0.0027 \text{ м}^2$$

Площадь поперечного сечения проводников обмотки ротора:

$$S_{M2} = Z_2 \cdot N_2 \cdot n_{эл2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d_{эл2\text{гол}}^2 = 48 \cdot 24 \cdot 3 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (1.32 \cdot 10^{-3})^2 = 0.0047 \text{ м}^2$$

Коэффициент теплопроводимости меди: $\lambda_M = 390 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Тепловое сопротивление между лобовой и пазовой частями обмотки статора:

$$R_{12} = \frac{l_1 + l_{л1}}{12 \cdot \lambda_M \cdot S_{M1}} = \frac{0.148 + 0.207}{12 \cdot 390 \cdot 0.0027} = 0.0286 \text{ К/Вт}$$

$$R_{12} = R_{21}$$

Тепловое сопротивление между лобовой и пазовой частями обмотки ротора:

$$R_{56} = \frac{l_2 + l_{л2}}{12 \cdot \lambda_M \cdot S_{M2}} = \frac{0.148 + 0.168}{12 \cdot 390 \cdot 0.0047} = 0.0143 \text{ К/Вт}$$

$$R_{56} = R_{65}$$

Периметр соприкосновения обмоток статора стенками паза:

$$\begin{aligned} \Pi_1 &= 2 \cdot h_{п1} + b_{п11} - 2 \cdot h_{кл1} - 6 \cdot \Delta_{ип1} = \\ &= 2 \cdot 0.0257 + 0.0079 - 2 \cdot 0.001 - 6 \cdot 0.0002 = 0.056 \text{ м} \end{aligned}$$

Периметр соприкосновения обмоток ротора стенками паза:

$$\begin{aligned} \Pi_2 &= 2 \cdot h_{п2} + b_{п22} - 2 \cdot h_{кл2} - 6 \cdot \Delta_{ип2} = \\ &= 2 \cdot 0.0391 + 0.0045 - 2 \cdot 0.001 - 6 \cdot 0.0002 = 0.0796 \text{ м} \end{aligned}$$

Коэффициент теплопроводимости изоляции паза: $\lambda_{ип} = 0.16 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Коэффициент теплопроводимости пропиточного лака: $\lambda_{лк} = 0.14 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

Коэффициент пропитки при вакуумной пропитке: $k_{пр} = 0.95$

Тепловое сопротивление пазовой изоляции статора с учетом зазора от расшихтовки:

$$R_{п11} = \frac{1}{\Pi_1 \cdot Z_1 \cdot l_1} \cdot \left[\frac{\Delta_{ип1}}{\lambda_{ип}} + \frac{0.0002}{0.03 + (\lambda_{лк} - 0.03) \cdot k_{пр} \cdot (2 - k_{пр})} \right] =$$

$$= \frac{1}{0.056 \cdot 72 \cdot 0.148} \cdot \left[\frac{0.0002}{0.16} + \frac{0.0002}{0.03 + (0.14 - 0.03) \cdot 0.95 \cdot (2 - 0.95)} \right]$$

$$= 0.0045 \text{ K/BT}$$

Тепловое сопротивление пазовой изоляции ротора с учетом зазора от расшихтовки:

$$R_{п12} = \frac{1}{\Pi_2 \cdot Z_2 \cdot l_2} \cdot \left[\frac{\Delta_{ип2}}{\lambda_{ип}} + \frac{0.0002}{0.03 + (\lambda_{лк} - 0.03) \cdot k_{пр} \cdot (2 - k_{пр})} \right] =$$

$$= \frac{1}{0.079 \cdot 48 \cdot 0.148} \cdot \left[\frac{0.0002}{0.16} + \frac{0.0002}{0.03 + (0.14 - 0.03) \cdot 0.95 \cdot (2 - 0.95)} \right]$$

$$= 0.0047 \text{ K/BT}$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки статора из круглого провода:

$$\lambda_{экв1} = 0.17 \cdot \left[1 + 0.81 \cdot d_{из1}^2 + d_{из1} \cdot (1 - 1.15 \cdot (1 - k_{пр})^2) \right] =$$

$$= 0.17 \cdot [1 + 0.81 \cdot (1.33 \cdot 10^{-3})^2 + 1.33 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 1.15 \cdot (1 - 0.95)^2)]$$

$$= 0.17 \frac{\text{BT}}{\text{м} \cdot \text{K}}$$

Эквивалентный коэффициент теплопроводности обмотки ротора из круглого провода:

$$\lambda_{экв2} = 0.17 \cdot \left[1 + 0.81 \cdot d_{из2}^2 + d_{из2} \cdot (1 - 1.15 \cdot (1 - k_{пр})^2) \right] =$$

$$= 0.17 \cdot [1 + 0.81 \cdot (1.4 \cdot 10^{-3})^2 + 1.4 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 1.15 \cdot (1 - 0.95)^2)]$$

$$= 0.17 \frac{\text{BT}}{\text{м} \cdot \text{K}}$$

Коэффициент формы паза, характеризующий двумерное температурное поле:

$$\xi_1 = \frac{b_{п11} + b_{п12}}{4 \cdot h_{п1} - b_{п11}} = \frac{0.0079 + 0.0058}{4 \cdot 0.0257 - 0.0079} = 0.1443$$

$$\xi_2 = \frac{b_{п21} + b_{п22}}{4 \cdot h_{п2} - b_{п21}} = \frac{0.0045 + 0.0045}{4 \cdot 0.0391 - 0.0045} = 0.0592$$

Тепловое сопротивление изоляции проводников в пазах статора:

$$R_{пэ1} = \frac{\xi_1 \cdot (1 - 0.5 \cdot \xi_1)}{6 \cdot Z_1 \cdot l_1 \cdot \lambda_{эКВ1}} = \frac{0.1443 \cdot (1 - 0.5 \cdot 0.1443)}{6 \cdot 72 \cdot 0.148 \cdot 0.17} = 0.0123 \text{ К/Вт}$$

Тепловое сопротивление изоляции проводников в пазах ротора:

$$R_{пэ2} = \frac{\xi_2 \cdot (1 - 0.5 \cdot \xi_2)}{6 \cdot Z_2 \cdot l_2 \cdot \lambda_{эКВ2}} = \frac{0.059 \cdot (1 - 0.5 \cdot 0.059)}{6 \cdot 48 \cdot 0.148 \cdot 0.17} = 0.0079 \text{ К/Вт}$$

Тепловое сопротивление от обмоток к стали сердечника статора:

$$R_{23} = R_{п1} + R_{пэ1} = 0.0045 + 0.0123 = 0.0168 \text{ К/Вт}$$

$$R_{23} = R_{32}$$

Тепловое сопротивление от обмоток к стали сердечника ротора:

$$R_{67} = R_{п2} + R_{пэ2} = 0.0047 + 0.0079 = 0.0127 \text{ К/Вт}$$

$$R_{67} = R_{76}$$

Коэффициент теплопроводности сердечника изготовленного из стали марки 2211:

$$\lambda_{Fe} = 32.5 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$$

Коэффициент заполнения сердечника сталью: $k_3 = 0.95$

Тепловое сопротивление зубцов на половину высоты:

$$R_z = \frac{h_{z1}}{2 \cdot Z_1 \cdot b_{z1} \cdot l_1 \cdot k_3 \cdot \lambda_{Fe}} = \frac{0.0257}{2 \cdot 72 \cdot 0.0071 \cdot 0.148 \cdot 0.95 \cdot 32.5} = 0.0055 \text{ К/Вт}$$

Тепловое сопротивление ярма статора:

$$R_j = \frac{h_{j1}}{\pi \cdot (D_a - h_{j1}) \cdot l_1 \cdot k_3 \cdot \lambda_{Fe}} = \frac{0.0283}{\pi \cdot (0.4 - 0.02830) \cdot 0.148 \cdot 0.95 \cdot 32.5} = 0.0053 \text{ К/Вт}$$

Тепловое сопротивление воздушного зазора между статором и станиной:

$$R_{\Delta ст} = \frac{\Delta_{стт.ЭКВ}}{\pi \cdot D_a \cdot l_1 \cdot \lambda_B}$$

По опытным данным:

$$\frac{\Delta_{стт.ЭКВ}}{\lambda_B} = 4.5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 3 \cdot D_a) = 4.5 \cdot 10^{-4} \cdot (1 + 3 \cdot 0.4) = 9.9 \cdot 10^{-4}$$

Следовательно:

$$R_{\Delta\text{ст}} = \frac{\Delta_{\text{стт.экв}}}{\pi \cdot D_a \cdot l_1 \cdot \lambda_b} = \frac{9.9 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0.4 \cdot 0.26} = 0.0053 \text{ К/Вт}$$

Тепловое сопротивление между сердечником статора и станиной:

$$R_{38} = R_z + R_j + R_{\Delta\text{ст}} = 0.0055 + 0.0053 + 0.0053 = 0.0161 \text{ К/Вт}$$

$$R_{38} = R_{83}$$

Площадь поверхности теплоотдачи лобовых частей:

$$\begin{aligned} S_{л1} &= 14 \cdot l_{\text{выл1}} \cdot [D + 1.4 \cdot h_{л1} + k_s \cdot Z_1 \cdot (h_{п1} - b_{z1})] = \\ &= 14 \cdot 0.0724 \cdot [0.292 + 1.4 \cdot 0.0275 + 0.1 \cdot 72 \cdot (0.0257 - 0.0071)] = 0.047 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

$$\text{где } h_{л1} = h_{п1} + 4.5 \cdot b_{из1} = 0.0257 + 4.5 \cdot 0.0004 = 0.0275 \text{ м}$$

$$k_s = 0.1$$

$$\begin{aligned} S_{л2} &= 14 \cdot l_{\text{выл2}} \cdot [D_2 + 1.4 \cdot h_{л2} + k_s \cdot 2 \cdot (2 - 2)] = \\ &= 14 \cdot 0.0595 \cdot [0.291 + 1.4 \cdot 0.0414 + 0.1 \cdot 48 \cdot (0.0391 - 0.0097)] = 0.4079 \text{ м}^2 \end{aligned}$$

$$\text{где } h_{л2} = h_{п2} + 4.5 \cdot b_{из2} = 0.039 + 4.5 \cdot 0.0005 = 0.0414 \text{ м}$$

Окружная скорость ротора:

$$\vartheta_p = \frac{\pi \cdot D_2 \cdot n_H}{60} = \frac{\pi \cdot 0.291 \cdot 750}{60} = 11.427 \text{ м/с}$$

Коэффициент теплоотдачи лобовых частей:

$$a_{л} = 20 + \frac{22 \cdot (\vartheta_p \cdot D_2)}{D_a} = 20 + \frac{22 \cdot (11.427 \cdot 0.291)}{0.4} = 163.826 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Тепловое сопротивление от лобовых частей обмотки статора к внутреннему воздуху с учетом изоляции проводов:

$$\begin{aligned} R_{14} &= \frac{1}{a_{л} \cdot S_{л1}} + \frac{1.5 \cdot R_{пз1} \cdot l_1}{p \cdot l_{л1}} = \frac{1}{163.826 \cdot 0.47} + \frac{1.5 \cdot 0.0123 \cdot 0.148}{4 \cdot 0.207} \\ &= 0.0163 \text{ К/Вт} \end{aligned}$$

$$R_{14} = R_{41}$$

Тепловое сопротивление от лобовых частей обмотки ротора к внутреннему воздуху с учетом изоляции проводов:

$$\begin{aligned} R_{45} &= \frac{1}{a_{л} \cdot S_{л2}} + \frac{1.5 \cdot R_{пз2} \cdot l_2}{p \cdot l_{л2}} = \frac{1}{163.826 \cdot 0.4} + \frac{1.5 \cdot 0.0079 \cdot 0.148}{4 \cdot 0.167} \\ &= 0.0176 \text{ К/Вт} \end{aligned}$$

$$R_{45} = R_{54}$$

Свободная площадь внутренней поверхности корпуса:

$$S_k = \pi \cdot D_a \cdot \left(L_{ст} - l_1 + h_{щ} + \frac{D_a}{2} \right) = \pi \cdot 0.4 \cdot \left(0.5 - 0.148 + 0.016 + \frac{0.4}{2} \right) \\ = 0.713 \text{ м}^2$$

Коэффициент теплоотдачи воздух-корпус:

$$a_k = 0.8 \cdot a_l = 0.8 \cdot 163.826 = 131.061 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Тепловое сопротивление от внутреннего воздуха к корпусу:

$$R_{48} = \frac{1}{a_k \cdot S_k} = \frac{1}{131.061 \cdot 0.713} = 0.0107 \text{ К/Вт}$$

$$R_{48} = R_{84}$$

Коэффициент теплоотдачи при ламинарном режиме течения:

$$a_{l\delta} = \frac{3.9 \cdot 10^{-2}}{\delta} = \frac{3.9 \cdot 10^{-2}}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 78 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Коэффициент теплоотдачи при турбулентном режиме течения:

$$a_{\tau\delta} = \frac{1.82 \cdot \sqrt{\vartheta_p}}{\sqrt[4]{\delta \cdot D_2}} = \frac{1.82 \cdot \sqrt{\vartheta_p}}{\sqrt[4]{\delta \cdot D_2}} = \frac{1.82 \cdot \sqrt{11.427}}{\sqrt[4]{0.5 \cdot 10^{-3} \cdot 0.291}} = 56.018 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Согласно рекомендациям [4] из двух полученных значений коэффициентов теплоотдачи истинным является большее:

$$a_\delta = a_{l\delta} = 78 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Тепловое сопротивление воздушного зазора между ротором и статором:

$$R_{37} = \frac{1}{a_\delta \cdot \pi \cdot D \cdot l_1} = \frac{1}{78 \cdot \pi \cdot 0.292 \cdot 0.148} = 0.0944 \text{ К/Вт}$$

Площадь поверхности статора контактирующая с внутренним воздухом:

$$S_c = \frac{\pi}{2} \cdot (D_a^2 - D^2) = \frac{\pi}{2} \cdot (0.4^2 - 0.292^2) = 0.1174 \text{ м}^2$$

Тепловое сопротивление между сердечником статора и внутренним воздухом:

$$R_{34} = \frac{1}{a_\delta \cdot S_c} = \frac{1}{78 \cdot 0.1147} = 0.109 \text{ К/Вт}$$

$$R_{34} = R_{43}$$

Площадь поверхности ротора контактирующая с внутренним воздухом:

$$S_p = \frac{\pi}{2} \cdot (D_2^2 - D_{\text{вал}}^2) = \frac{\pi}{2} \cdot (0.291^2 - 0.092^2) = 0.1197 \text{ м}^2$$

Тепловое сопротивление между сердечником ротора и внутренним воздухом:

$$R_{47} = \frac{1}{a_\delta \cdot S_p} = \frac{1}{78 \cdot 0.1197} = 0.107 \text{ К/Вт}$$

$$R_{47} = R_{74}$$

2.5. Расчет тепловой схемы

Уравнение теплового баланса:

$$\lambda_{12} \cdot (\theta_1 - \theta_2) + \lambda_{14} \cdot (\theta_1 - \theta_4) = P_1 + \frac{\theta_1 \cdot P_1}{255}$$

$$\lambda_{21} \cdot (\theta_2 - \theta_1) + \lambda_{23} \cdot (\theta_2 - \theta_3) = P_2 + \frac{\theta_2 \cdot P_2}{255}$$

$$\lambda_{32} \cdot (\theta_3 - \theta_2) + \lambda_{37} \cdot (\theta_3 - \theta_7) + \lambda_{38} \cdot (\theta_3 - \theta_8) = P_3$$

$$\lambda_{41} \cdot (\theta_4 - \theta_1) + \lambda_{45} \cdot (\theta_4 - \theta_5) + \lambda_{48} \cdot (\theta_4 - \theta_8) = P_4$$

$$\lambda_{54} \cdot (\theta_5 - \theta_4) + \lambda_{56} \cdot (\theta_5 - \theta_6) = P_5 + \frac{\theta_5 \cdot P_5}{255}$$

$$\lambda_{65} \cdot (\theta_6 - \theta_5) + \lambda_{67} \cdot (\theta_6 - \theta_7) = P_6 + \frac{\theta_6 \cdot P_6}{255}$$

$$\lambda_{73} \cdot (\theta_7 - \theta_3) + \lambda_{76} \cdot (\theta_7 - \theta_6) = P_7$$

$$\lambda_{83} \cdot (\theta_8 - \theta_3) + \lambda_{84} \cdot (\theta_8 - \theta_4) + \lambda_{80} \cdot \theta_8 = P_8$$

Суммарная проводимость узлов:

$$\lambda_{11} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{14}} - \frac{P_1}{225} = \frac{1}{0.0286} + \frac{1}{0.0163} - \frac{953.613}{225} = 92.098$$

$$\lambda_{12} = \lambda_{21} = \frac{-1}{R_{12}} = \frac{-1}{R_{21}} = \frac{-1}{0.0286} = -34.926$$

$$\lambda_{14} = \lambda_{41} = \frac{-1}{R_{14}} = \frac{-1}{R_{41}} = \frac{-1}{0.0163} = -61.41$$

$$\lambda_{22} = \frac{1}{R_{21}} + \frac{1}{R_{23}} - \frac{P_2}{225} = \frac{1}{0.0286} + \frac{1}{0.0163} - \frac{681.77}{225} = 97.505$$

$$\lambda_{23} = \lambda_{32} = \frac{-1}{R_{23}} = \frac{-1}{R_{32}} = \frac{-1}{0.0168} = -59.548$$

$$\lambda_{33} = \frac{1}{R_{32}} + \frac{1}{R_{34}} + \frac{1}{R_{37}} + \frac{1}{R_{38}} = \frac{1}{0.0168} + \frac{1}{0.109} + \frac{1}{0.0944} + \frac{1}{0.0161} = 141.374$$

$$\lambda_{37} = \lambda_{73} = \frac{-1}{R_{37}} = \frac{-1}{R_{73}} = \frac{-1}{0.0944} = -10.594$$

$$\lambda_{38} = \lambda_{83} = \frac{-1}{R_{38}} = \frac{-1}{R_{83}} = \frac{-1}{0.0161} = -62.074$$

$$\begin{aligned} \lambda_{44} &= \frac{1}{R_{41}} + \frac{1}{R_{43}} + \frac{1}{R_{45}} + \frac{1}{R_{47}} + \frac{1}{R_{48}} = \\ &= \frac{1}{0.0163} + \frac{1}{0.1092} + \frac{1}{0.0176} + \frac{1}{0.1071} + \frac{1}{0.107} = 230.349 \end{aligned}$$

$$\lambda_{45} = \lambda_{54} = \frac{-1}{R_{45}} = \frac{-1}{R_{54}} = \frac{-1}{0.0176} = -56.908$$

$$\lambda_{48} = \lambda_{84} = \frac{-1}{R_{48}} = \frac{-1}{R_{84}} = \frac{-1}{0.0107} = -93.535$$

$$\lambda_{55} = \frac{1}{R_{54}} + \frac{1}{R_{56}} - \frac{P_5}{225} = \frac{1}{0.0176} + \frac{1}{0.0143} - \frac{545.909}{225} = 124.429$$

$$\lambda_{56} = \lambda_{65} = \frac{-1}{R_{56}} = \frac{-1}{R_{65}} = \frac{-1}{0.0143} = -69.947$$

$$\lambda_{66} = \frac{1}{R_{64}} + \frac{1}{R_{67}} - \frac{P_6}{225} = \frac{1}{0.0143} + \frac{1}{0.0127} - \frac{480.108}{225} = 146.85$$

$$\lambda_{67} = \lambda_{76} = \frac{-1}{R_{67}} = \frac{-1}{R_{76}} = \frac{-1}{0.0127} = -79.037$$

$$\lambda_{77} = \frac{1}{R_{73}} + \frac{1}{R_{74}} + \frac{1}{R_{76}} = \frac{1}{0.0944} + \frac{1}{0.107} + \frac{1}{0.0127} = 98.97$$

$$\lambda_{88} = \frac{1}{R_{80}} + \frac{1}{R_{83}} + \frac{1}{R_{84}} = \frac{1}{0.0104} + \frac{1}{0.0161} + \frac{1}{0.0107} = 252.091$$

Представим систему уравнений тепловой схемы в матричной форме

$$A = \begin{Bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & 0 & \lambda_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \lambda_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_{32} & \lambda_{33} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{37} & \lambda_{38} \\ \lambda_{41} & 0 & 0 & \lambda_{44} & \lambda_{45} & 0 & 0 & \lambda_{48} \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_{54} & \lambda_{55} & \lambda_{56} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{65} & \lambda_{66} & \lambda_{67} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_{73} & 0 & 0 & \lambda_{76} & \lambda_{77} & \lambda_0 \\ 0 & 0 & \lambda_{83} & \lambda_{84} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{88} \end{Bmatrix} \quad B = \begin{Bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \end{Bmatrix} \quad C = A^{-1} \cdot B$$

$$= \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \\ \theta_5 \\ \theta_6 \\ \theta_7 \\ \theta_8 \end{Bmatrix}$$

A

$$= \begin{Bmatrix} 92.098 & -34.926 & 0 & -61.410 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -34.926 & 97.505 & -59.548 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -59.548 & 141.374 & 0 & 0 & 0 & -10.594 & -62.074 \\ -61.410 & 0 & 0 & 230.349 & -56.908 & 0 & 0 & -93.535 \\ 0 & 0 & 0 & -56.908 & 124.429 & -69.947 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -69.943 & 146.850 & -73.037 & 0 \\ 0 & 0 & -10.594 & 0 & 0 & -79.034 & 98.970 & 0 \\ 0 & 0 & -62.074 & -93.535 & 0 & 0 & 0 & 252.091 \end{Bmatrix}$$

$$B = \begin{Bmatrix} 953.613 \\ 681.770 \\ 527.517 \\ 28.080 \\ 545.909 \\ 480.108 \\ 220 \\ 28.080 \end{Bmatrix}$$

$$C = \begin{Bmatrix} 54.186 \\ 50.246 \\ 37.043 \\ 37.158 \\ 52.795 \\ 55.880 \\ 51.028 \\ 23.512 \end{Bmatrix}$$

Превышение температуры статора:

$$\theta_{m1} = \frac{\theta_1 \cdot l_{л1} + \theta_2 \cdot l_1}{l_{л1} + l_1} = \frac{54.186 \cdot 0.207 + 50.246 \cdot 0.148}{0.207 + 0.148} = 52.543 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Превышение температуры ротора:

$$\theta_{m2} = \frac{\theta_5 \cdot l_{л2} + \theta_6 \cdot l_2}{l_{л2} + l_2} = \frac{52.795 \cdot 0.168 + 55.880 \cdot 0.148}{0.168 + 0.148} = 54.239 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Заключение

В результате проведённого теплового расчёта были определены превышения температуры ротора и температуры статора над температурой окружающей среды. Данный расчёт показал, что полученные температуры входят в предел допустимых температур для класса F.

3. Механический расчёт

Металлургические электродвигатели работают в условиях повышенной тряски, вибраций и высокой температуре окружающего воздуха. Вал асинхронного двигателя является одной из наиболее ответственных деталей. Механический расчет вала состоит из расчета на прочность и жесткость. Данная машина выполняется с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несёт на себе всю массу вращающихся частей, через него передаётся силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал также должен иметь достаточную жёсткость, чтобы при работе двигателя ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины. При критической частоте вращения вынуждающая сила небаланса имеет частоту, равную частоте собственных поперечных колебаний вала (т.е. наступает явление резонанса), при котором резко увеличивается прогиб вала и вибрация двигателя. В данном случае вал изготавливается из углеродистой стали марки 45. Для повышения механических свойств сталей, их подвергают термической обработке. Размеры вала определяют при разработке конструкции. Вал имеет ступенчатую форму с большим диаметром в месте посадки магнитопровода. Число ступеней вала зависит от количества узлов машины, размещаемых на нем. При переходе с одного диаметра вала на другой предупреждения недопустимой концентрации напряжений в местах переходов должна быть предусмотрены закругления максимального возможного радиуса. Окончательные размеры вала устанавливаются после расчетов на жесткость и прочность.

3.1. Расчет вала на жесткость

При расчете прогиба вала принимают, что вся масса активной стали ротора с обмоткой и участка вала под ним приложена в виде сосредоточенной силы G_p посередине длины магнитопровода. массой частей вала ближе к опорам можно пренебречь. Принимая, что ротор двигателя представляет собой сплошной цилиндр с плотностью 8300 кг/м^3 , его массу можно определить как:

$$m_p = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0.291^2 \cdot 0.148 = 81.5 \text{ кг}$$

Сила тяжести ротора:

$$G_p = 9.8 \cdot m_p = 9.8 \cdot 81.5 = 798.723 \text{ Н}$$

Номинальный вращающий момент:

$$M_H = 9.55 \cdot P_{2H}/n_H = 9.55 \cdot 22000/750 = 280.133 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Сочленение двигателя с приводом через эластичную муфту по ГОСТ 21424-75.

Диаметр муфты по центрам пальцев: $D_{M1}=190 \cdot 10^3 \text{ м}$.

Размеры вала приведены на рисунке 3.1.

Поперечные силы, приложенные к выступающему концу вала, вызванные неточностью сопряжения вала изготовлением детали муфты:

$$F_H = 2 \cdot k_H \cdot M_H/D_{M1} = 2 \cdot 0.3 \cdot 280.133/190 \cdot 10^3 = 884.631 \text{ Н}$$

где $k_H=0.3$ – коэффициент при передаче муфтой [1, с. 397].

Эквивалентный момент инерции вала:

$$J = \pi \cdot d^4/64$$

При определении прогиба вала воспользуемся аналитическим методом. Для этого необходима разбить вал на три участка. Определим прогиб вала посередине сердечника ротора под действием силы тяжести:

$$f_G = \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) = \frac{798.723}{3 \cdot 669^2 \cdot 2.06 \cdot 10^{11}} \cdot (0.327^2 \cdot 11731.452 + 0.342^2 \cdot 10181.136) = 7.0612 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

где $E=2.06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ – модуль упругости.

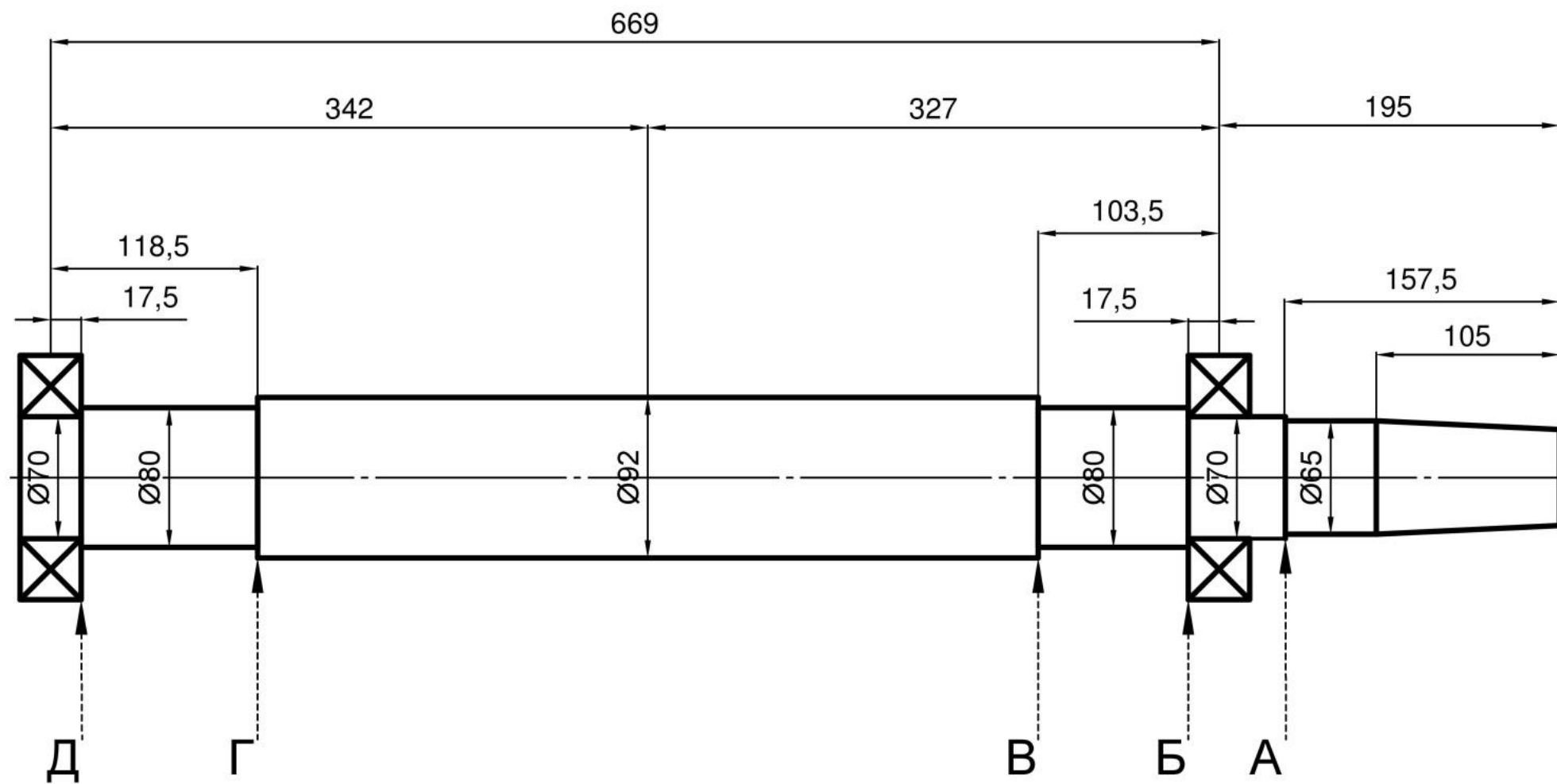


Рисунок 3.1. Эскиз вала

№ участка	Участок А					
	d _i , м	J _i , м ⁴	x _i , м	x _i ³ , м ³	x _i ³ -x _{i-1} ³ , м ³	x _i ³ -x _{i-1} ³ / J _i , м ⁻¹
1	70·10 ⁻³	1.178·10 ⁻⁶	17.5·10 ⁻³	5.359·10 ⁻⁶	5.359·10 ⁻⁶	4.547
2	80·10 ⁻³	2.01·10 ⁻⁶	103.5·10 ⁻³	1.108·10 ⁻³	1.103·10 ⁻³	548.765
3	92·10 ⁻³	3.516·10 ⁻⁶	327·10 ⁻³	34.965·10 ⁻³	33.857·10 ⁻³	9627.823
$S_a = \Sigma \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} = 10181.136 \text{ м}^{-1}$						

№ участ-ка	Участок В								
	d _i , м	J _i , м ⁴	y _i , м	y _i ³ , м ³	y _i ³ -y _{i-1} ³ , м ³	y _i ³ -y _{i-1} ³ / J _i , м ⁻¹	y _i ² , м ³	y _i ² -y _{i-1} ² , м ²	y _i ² -y _{i-1} ² / J _i , м ⁻²
1	70·10 ⁻³	1.178·10 ⁻⁶	17.5·10 ⁻³	5.359·10 ⁻⁶	5.359·10 ⁻⁶	4.547	0.306·10 ⁻³	0.306·10 ⁻³	259.844
2	80·10 ⁻³	2.01·10 ⁻⁶	118.5·10 ⁻³	1.664·10 ⁻³	1.658·10 ⁻³	824.943	14.042·10 ⁻³	13.736·10 ⁻³	6831.725
3	92·10 ⁻³	3.516·10 ⁻⁶	342·10 ⁻³	40.001·10 ⁻³	38.337·10 ⁻³	10901.961	116.964·10 ⁻³	102.921·10 ⁻³	29267.752
$S_b = \Sigma \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = 11731.452 \text{ м}^{-1}$							$S_0 = \Sigma \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i} = 36359.093 \text{ м}^{-2}$		

Таблица 3.1. Расчет S_a, S_b, S₀

Прогиб вала посередине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты:

$$f_{\Pi} = \frac{F_{\Pi} \cdot c}{3 \cdot E \cdot I^2} \cdot \left(\left(\frac{3}{2} \cdot l \cdot S_0 - S_b \right) \cdot a + b \cdot S_a \right) = \frac{884.631 \cdot 194.5 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.669^2} \cdot \left(\left(\frac{3}{2} \cdot 0.669 \cdot 36359.093 - 11731.452 \right) \cdot 0.327 + 0.342 \cdot 10181.136 \right) = 7.201 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Первоначальное смещение ротора:

$$e_0 = 0.1 \cdot \delta + f_G + f_{\Pi} = 0.1 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} + 5.3799 \cdot 10^{-9} + 7.201 \cdot 10^{-6} = 64.263 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения:

$$T_0 = 2.94 \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = 2.94 \cdot 0.291 \cdot 0.148 \cdot \frac{64.263 \cdot 10^{-6}}{0.5 \cdot 10^{-3}} \cdot 10^5 = 1628.176 \text{ Н}$$

Прогиб вала от силы T_0 :

$$f_T = f_G \cdot T_0 / G_p = 5.3799 \cdot 10^{-9} \cdot 1628.1761 / 5.3799 \cdot 10^{-9} = 14.394 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения:

$$f_M = \frac{f_T}{1 - m} = \frac{14.394 \cdot 10^{-6}}{1 - 0.224} = 18.549 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

где $m = f_T / e_0 = 14.394 \cdot 10^{-6} / 64.263 \cdot 10^{-6} = 0.224$

Суммарный прогиб посередине магнитопровода ротора:

$$f = f_M + f_T + f_{\Pi} = 18.549 \cdot 10^{-6} + 14.394 \cdot 10^{-6} + 7.201 \cdot 10^{-6} = 32.812 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Согласно рекомендациям [1] при применении упругой соединительной муфты суммарный прогиб в процентах длины воздушного зазора должен составлять не более 10%. Условие выполняется: f составляет 6.562% от воздушного зазора.

Критическая частота вращения вала:

$$n_K = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - m}{f_G}} = 30 \sqrt{\frac{1 - 0.224}{5.3799 \cdot 10^{-9}}} = 9945.2352 \text{ об/мин}$$

Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической не менее чем на 30%

$$1.3 \cdot n = 1.3 \cdot 750 = 975 \text{ об/мин}$$

9945.235 > 975 – что удовлетворяет условию

3.2. Расчет вала на прочность

Вал асинхронного двигателя передает вращающий момент и, кроме того, испытывает изгибающие условия от сил тяжести, магнитного притяжения и от поперечных сил на свободном конце. В результате этого вал испытывает совместное действие напряжения изгиба и напряжения кручения.

Нагрузка от установившегося магнитного притяжения:

$$T = \frac{T_0}{1 - m} = \frac{1628.1761}{1 - 0.224} = 2098.133 \text{ Н}$$

Напряжение в сечении А:

$$M_{иА} = k \cdot F_n \cdot z_1 = 2 \cdot 884.631 \cdot 157.5 \cdot 10^{-3} = 278.658 \text{ Н}$$

где коэффициент перегрузки принимаем: $k=2$.

Момент сопротивления при изгибе в сечении А:

$$W_A = 0.1 \cdot d_2^3 = 0.1 \cdot (70 \cdot 10^{-3})^3 = 34.310^{-6} \text{ м}$$

Напряжение при изгибе и кручении в сечении А:

$$\begin{aligned} \sigma_{прА} &= \frac{1}{W_A} \cdot \sqrt{W_{иА}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2} = \\ &= \frac{1}{34.310^{-6}} \cdot \sqrt{278.658^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 280.133)^2} = 12.73 \cdot 10^6 \text{ Па} \end{aligned}$$

где отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному напряжению при кручении принимаем: $\alpha=0.6$.

Напряжение в сечении Б:

$$M_{иБ} = k \cdot F_n \cdot c \cdot \left(1 - \frac{y_1}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{\alpha \cdot y_1}{l} = 2 \cdot 884.631 \cdot 194.5 \cdot 10^{-3} \cdot$$

$$\cdot \left(1 - \frac{17.5 \cdot 10^{-3}}{0.669}\right) + (798.723 + 2098.133) \cdot \frac{0.6 \cdot 17.5 \cdot 10^{-3}}{0.669} = 359.899 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении Б:

$$W_B = 0.1 \cdot d_4^3 = 0.1 \cdot (80 \cdot 10^{-3})^3 = 51.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Напряжение при изгибе и кручении в сечении Б:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{прБ}} &= \frac{1}{W_B} \cdot \sqrt{W_{\text{иБ}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2} = \\ &= \frac{1}{51.2 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{359.899^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 280.133)^2} = 9.618 \cdot 10^6 \text{ Па} \end{aligned}$$

Напряжение в сечении В:

$$\begin{aligned} M_{\text{иВ}} &= k \cdot F_n \cdot c \cdot \left(1 - \frac{y_2}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{\alpha \cdot y_2}{l} = 2 \cdot 884.631 \cdot 194.5 \cdot 10^{-3} \cdot \\ &\cdot \left(1 - \frac{118.5 \cdot 10^{-3}}{0.669}\right) + (798.723 + 2098.133) \cdot \frac{0.6 \cdot 118.5 \cdot 10^{-3}}{0.669} \\ &= 450.957 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении В:

$$W_B = 0.1 \cdot d_5^3 = 0.1 \cdot (92 \cdot 10^{-3})^3 = 77.869 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Напряжение при изгибе и кручении в сечении В:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{прВ}} &= \frac{1}{W_B} \cdot \sqrt{W_{\text{иВ}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2} = \\ &= \frac{1}{77.869 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{450.957^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 280.133)^2} = 7.223 \cdot 10^6 \text{ Па} \end{aligned}$$

Напряжение в сечении Д:

$$\begin{aligned} M_{\text{иД}} &= [k \cdot F_n \cdot c + (G_p + T) \cdot b] \cdot \frac{\alpha \cdot x_1}{l} = [2 \cdot 884.631 \cdot 194.5 \cdot 10^{-3} + \\ &+ (798.723 + 2098.133) \cdot 0.342] \cdot \frac{0.6 \cdot 17.5 \cdot 10^{-3}}{0.669} = 34.917 \text{ Н} \cdot \text{м} \end{aligned}$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении Д:

$$W_D = 0.1 \cdot d_6^3 = 0.1 \cdot (70 \cdot 10^{-3})^3 = 34.3 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Напряжение при изгибе и кручении в сечении Д:

$$\sigma_{\text{прД}} = \frac{1}{W_{\text{Д}}} \cdot \sqrt{W_{\text{иД}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{\text{Н}})^2} =$$

$$= \frac{1}{34.3 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{34.917^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 280.133)^2} = 9.853 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

Напряжение в сечении Г:

$$M_{\text{иГ}} = [k \cdot F_{\text{п}} \cdot c + (G_{\text{р}} + T) \cdot b] \cdot \frac{\alpha \cdot x_2}{l} = [2 \cdot 884.631 \cdot 194.5 \cdot 10^{-3} +$$

$$+ (798.723 + 2098.133) \cdot 0.342] \cdot \frac{0.6 \cdot 118.5 \cdot 10^{-3}}{0.669} = 206.512 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления при изгибе в сечении Г:

$$W_{\text{Г}} = 0.1 \cdot d_7^3 = 0.1 \cdot (80 \cdot 10^{-3})^3 = 51.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

Напряжение при изгибе и кручении в сечении Г:

$$\sigma_{\text{прГ}} = \frac{1}{W_{\text{Г}}} \cdot \sqrt{W_{\text{иГ}}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_{\text{Н}})^2} =$$

$$= \frac{1}{51.2 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{206.512^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 280.133)^2} = 7.705 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

3.3. Выбор подшипников

Основным критерием работоспособности подшипника качения является динамическая и статическая грузоподъемность. Для электрических машин с горизонтальным расположением вала осевую нагрузку принимаем равную нулю. Диаметр цапфа $d=0.1$ м.

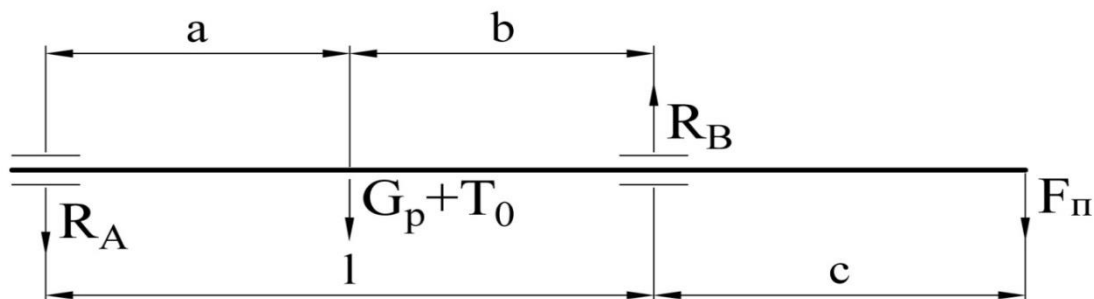


Рисунок 3.2. Радиальные реакции подшипников

Радиальная нагрузка на опоре А:

$$R_A = F_n \cdot \frac{c}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{b}{l} = 884.631 \cdot \frac{0.1945}{0.669} + (798.723 + 1628.176) \cdot \frac{0.342}{0.669} = 1497.848 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка:

$$Q_A = K_H \cdot R_A = 2 \cdot 1497.848 = 2995.696 \text{ Н}$$

где $K_H = 2$ – коэффициент учитывающий характер нагрузки двигателя, при нагрузке со значительными толчками.

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника:

$$C = \frac{Q_A}{25.6} \cdot \sqrt[3]{L_d \cdot n} = \frac{2995.696}{25.6} \cdot \sqrt[3]{20 \cdot 10^3 \cdot 750} = 28859.465 \text{ Н}$$

Срок службы (или долговечность) подшипника принимаем: $L_d = 20 \cdot 10^3$ ч

Радиальная нагрузка на опоре В:

$$R_B = F_n \cdot \frac{l+c}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{a}{l} = 884.631 \cdot \frac{0.669 + 0.1945}{0.669} + (798.723 + 1628.176) \cdot \frac{0.327}{0.669} = 2328.065 \text{ Н}$$

Приведенная нагрузка:

$$Q_B = K_H \cdot R_B = 2 \cdot 2328.065 = 4656.130 \text{ Н}$$

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника:

$$C = \frac{Q_B}{25.6} \cdot \sqrt[3]{L_d \cdot n} = \frac{4656.130}{25.6} \cdot \sqrt[3]{20 \cdot 10^3 \cdot 750} = 44855.486 \text{ Н}$$

Принимаем по таблице П-36 [1, с. 482] шарикоподшипник радиальный однородный, средняя серия, условное обозначение 314, $d=70$ мм, $D=150$ мм, $B=35$ мм, $r=3.5$ мм, динамическая грузоподъемность $C_0=63200$ Н, $n=4000$ об/мин. ГОСТ 8338-75.

Заключение

В результате механического расчета был определен суммарный прогиб вала, который составляет 6.562% от воздушного зазора, что допустимо. Также была определена критическая частота вращения вала $n_k = 9945$ об/мин. Рабочая частота вращения ротора должна отличаться от критической не более чем на 30%.

$1.3 \cdot n = 1.3 \cdot 750 = 975$ об/мин; $9945.235 > 975$ – что удовлетворяет условию

Из сопоставления полученных следует, что наиболее нагруженным является сечение А. Допустимое значение напряжения не должно превышать 0,7 от предела текучести стали. Для стали марки 45 предел текучести $3600 \cdot 10^5$ Па.

$\sigma_{np} = 1273 \cdot 10^4 < 0.7 \cdot 3600 \cdot 10^5$ – условие выполняется.

По результатам расчета принимаем шарикоподшипники радиальный однородный 314 средней серии.

4. Специальная часть

Пуско–тормозные и регулировочные резисторы в металлургических электроприводах используются при параметрических методах регулирования. Получение механических характеристик, обеспечивающих заданные показатели регулирования и требуемые пуско–тормозные диаграммы переходных режимов, достигается введением активных сопротивлений в цепи обмоток ротора двигателей. Реактивные сопротивления в крановых электроприводах не нашли практического применения.

При расчете и выборе резисторов для главных цепей электроприводов одновременно должны решаться две задачи:

1. обеспечение необходимых механических характеристик, реализующих требуемый уровень ускорения;
2. обеспечение соответствия теплового режима резисторов режиму работы двигателя.

Для выполнения первого условия определяются значения ступеней сопротивления, соответствующие получению необходимых абсолютных значений пусковых моментов электродвигателя. Для выполнения второго условия необходимо определить соответствующую рассеиваемую мощность резистора в целом (выбрать режим продолжительности включения при этой мощности и установить необходимую нагрузку отдельных ступеней резисторов).

Среднее значение нагрузки резисторов крановых электроприводов не может быть однозначно установлено в связи с тем, что режим работы, как электропривода, так и резисторов весьма неопределенный, зависящий от многих факторов.

Целью специальной части является – выбор типового комплекта – ящика резисторов для пуска асинхронного металлургического двигателя с фазным ротором. Этот же ящик, при необходимости, может быть использован и для параметрического регулирования скорости двигателя. При этом расчет

ступеней резисторов значительно упрощается и выполняется по таблицам разбивки сопротивлений, рекомендуемым заводами – изготовителями серийного электрооборудования применительно к типовым схемам.

Сопротивления в цепи ротора асинхронных двигателей включаются по симметричным и несимметричным схемам. Симметричное включение сопротивлений применяется в системах с панелями управления, а несимметричное – с кулачковыми контроллерами для уменьшения числа используемых при переключениях контактов. Несимметричное включение подразумевает неравные сопротивления в каждой фазе, которые порождают в них несимметричные токи и провалы моментов, и как следствие этого неустойчивое регулирование частоты вращения. Это делается для уменьшения стоимости ящика резисторов и системы управления. Для крановых двигателей средней и большой мощности наиболее целесообразно использовать симметричное включение сопротивлений в цепи обмоток ротора, так как это обеспечит наиболее плавный пуск, а цена типового комплекта электропривода по сравнению с ценой двигателя не играет роли. При расчете пусковых сопротивлений, включенных по симметричной схеме, предварительно для заданного режима работы строят диаграмму пускового режима. Условиями пуска являются колебание пускового момента между максимальным M_2 и минимальным M_1 значениями.

4.1. Построение пусковой диаграммы и расчет сопротивлений ступеней

Исходные данные к расчету пускового реостата

$$n_n=714 \text{ об/мин}$$

$$s_n=0.0479$$

$$n_c=750 \text{ об/мин}$$

$$P_n=22\,000 \text{ Вт}$$

$$M_{кр}/M_{ном}=2.396 \text{ о.е.}$$

$$r_{2нагр}=0.2256 \text{ Ом}$$

$$I_{2н}=43.7978 \text{ А}$$

Расчет и построение механических характеристик проводим для пяти пусковых ступеней. Количество пусковых ступеней выбираем исходя из технико-экономических соображений: чем больше число ступеней, тем плавнее пуск, но вместе с этим дороже ящик пусковых резисторов.

Для двигателя мощностью 22 кВт наиболее оптимальным числом пусковых ступеней является $m=5$.

Определяем номинальный момент двигателя:

$$M_H = 9500 \cdot P_H / n_H = 9500 \cdot 22000 / 714 = 294234.18 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определяем критический момент двигателя:

$$M_{кр} = \frac{M_{кр}}{M_{ном}} \cdot M_H = 2.396 \cdot 294234.18 = 704977.9 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Принимаем наибольший пусковой момент двигателя

$$M_1 = 0.95 \cdot M_{кр} = 0.95 \cdot 704977.9 = 669729 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определяем момент переключения:

$$M'_2 = \frac{M_1}{M_H} \cdot \sqrt[5]{\frac{M_1}{M_H} \cdot s_H} = \frac{669729}{294234.18} \cdot \sqrt[5]{\frac{669729}{294234.18} \cdot 0.0479} = 1.4613 \text{ о. е.}$$

$$M_2 = M'_2 \cdot M_H = 1.4613 \cdot 294234.18 = 429965.88 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Расчет сопротивлений ступеней пускового резистора для асинхронного двигателя с фазным ротором по приближенному способу основан на прямолинейности механических характеристик.

Естественная механическая характеристика – зависимость $n=f(M)$ при отсутствии добавочных сопротивлений в цепи ротора. Она проходит через две характерные точки:

- $M=0$; $n=n_c$ – точка синхронной частоты вращения;
- $M=M_H$; $n=n_H$ – точка номинального момента и частоты вращения.

Формула для такой характеристики имеет вид:

$$M = M_H \cdot \frac{s}{s_H}$$

Искусственные характеристики получаются при введении добавочных активных резисторов в цепь обмотки ротора. Искусственные характеристики

также являются прямолинейными и проходят тем круче, чем больше сопротивление добавочного резистора.

Механические характеристики пуска двигателя приведены на рисунке 4.1.

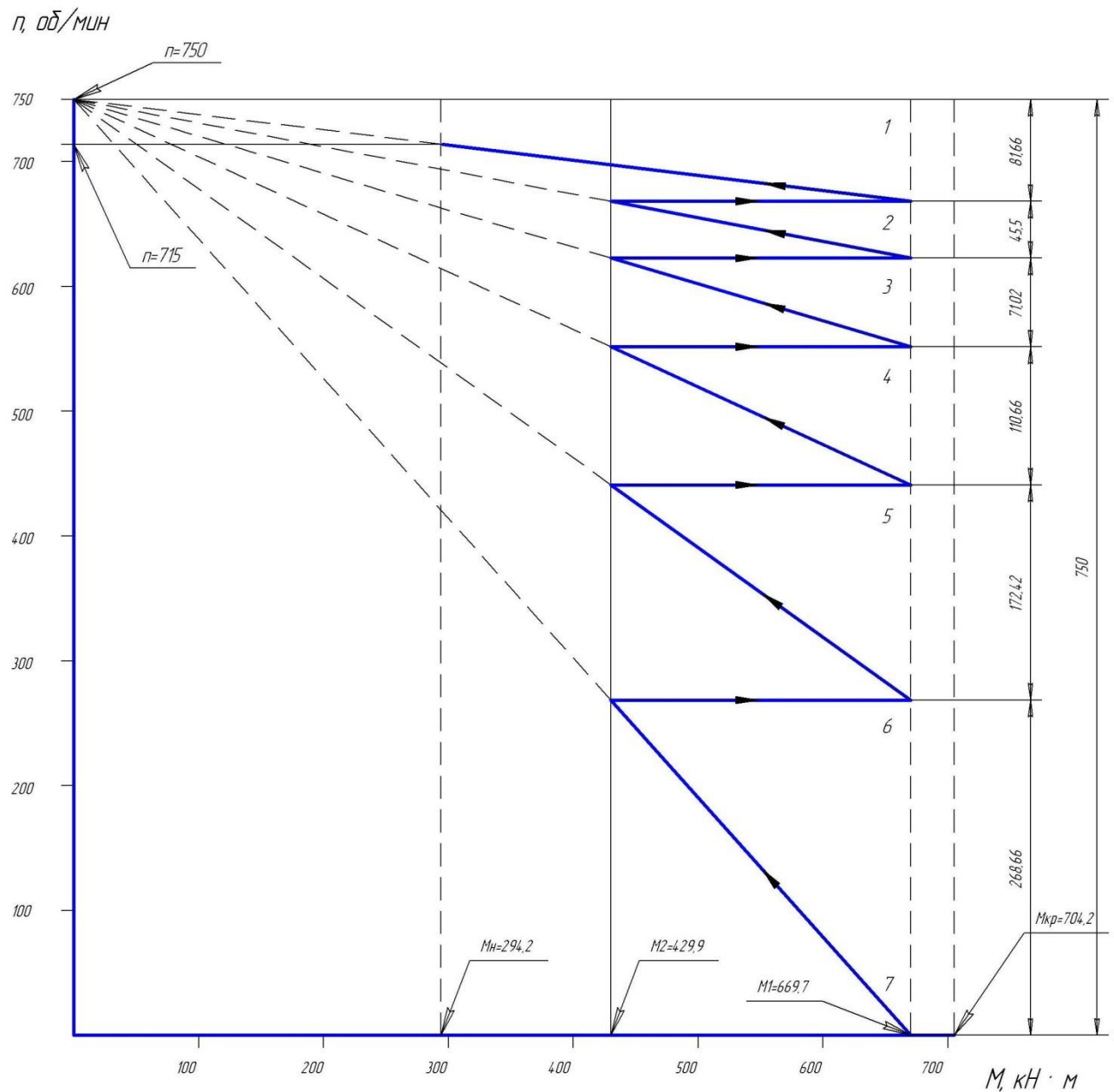


Рисунок 4.1. Пусковая диаграмма асинхронного двигателя с фазным ротором.

Наклон естественной механической характеристики прямо пропорционален активному сопротивлению ротора, т.е. длина участка 1-2 пропорциональна $r_{2\text{нагр}}$ (см. рисунок 4.1.). Рассчитаем коэффициент пропорциональности:

$$m_R = r_{2\text{нагр}}/L_{1-2} = 0.2256/81.66 = 0.0028 \text{ Ом/мм}$$

Наклон искусственных механических характеристик также прямо пропорционален добавочным пусковым сопротивлениям. Определяем добавочные пусковые сопротивления для каждой ступени отдельно, умножая полученный ранее коэффициент пропорциональности m_R на длины соответствующих участков (доли сопротивлений ступеней):

$$R_{п1} = m_R \cdot L_{7-6} = 0.0028 \cdot 268.66 = 0.7422 \text{ Ом}$$

$$R_{п2} = m_R \cdot L_{6-5} = 0.0028 \cdot 172.42 = 0.4763 \text{ Ом}$$

$$R_{п3} = m_R \cdot L_{5-4} = 0.0028 \cdot 110.66 = 0.3057 \text{ Ом}$$

$$R_{п4} = m_R \cdot L_{4-3} = 0.0028 \cdot 71.02 = 0.1962 \text{ Ом}$$

$$R_{п5} = m_R \cdot L_{3-2} = 0.0028 \cdot 45.58 = 0.1259 \text{ Ом}$$

$$\begin{aligned} \Sigma R_{п} &= R_{п1} + R_{п2} + R_{п3} + R_{п4} + R_{п5} = \\ &= 0.7422 + 0.4763 + 0.3057 + 0.1962 + 0.1259 = 1.8464 \text{ Ом} \end{aligned}$$

4.2. Выбор типового ящика резисторов

В соответствии с рассчитанными пусковыми сопротивлениями, обеспечением соответствия теплового режима резисторов режиму работы двигателя и номинальным током ротора $I_{2н}=43.7978 \text{ А}$, выбираем ящик пусковых резисторов Б6МУ2 по конструкторскому документу ИФРЮ.434352.001-07.

Блоки резисторов крановые Б6М предназначены для пуска, регулирования скорости и торможения крановых электродвигателей постоянного и переменного тока. Блоки классифицируются по климатическому исполнению и категории размещения.

Структура условного обозначения Б6М[*][**]:

Б – блоки резисторов серии Б;

6 – максимальное число резисторных элементов в блоке;

М – модернизированные;

[*][**] – климатическое исполнение и категория размещения по ГОСТ 15150

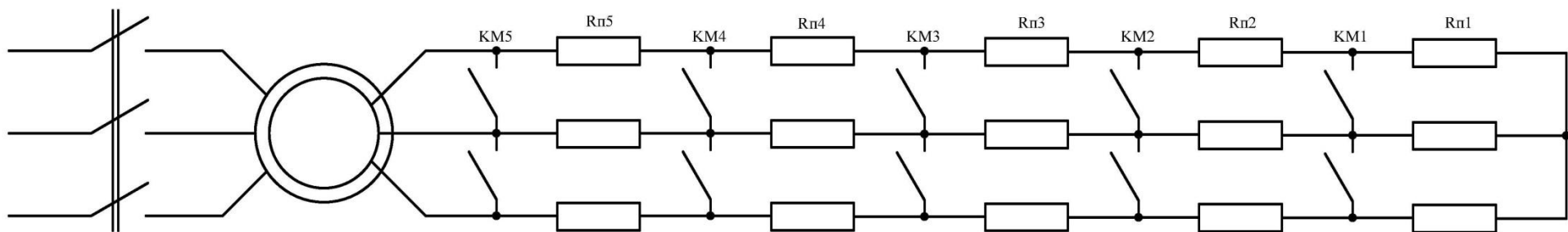


Рисунок 4.2. Принципиальная электрическая схема пуска асинхронного двигателя с помощью резисторов в цепи ротора.

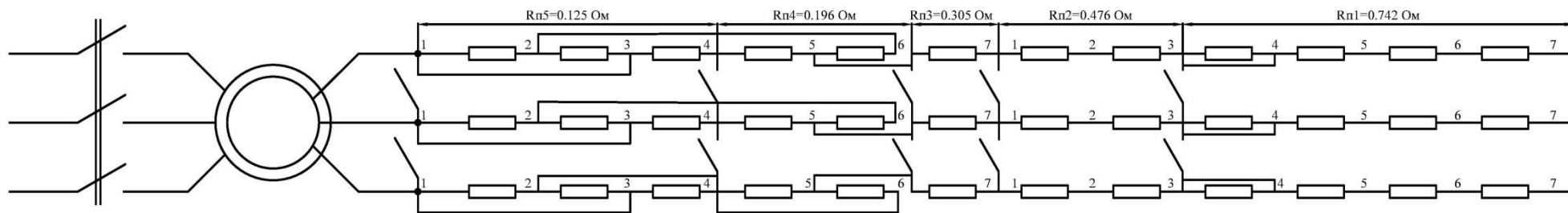


Рисунок 4.3. Монтажная схема соединений ящиков резисторов Б6МУ2

4.3. Особенности конструкции блока Б6М

Блок представляет собой конструкцию открытого исполнения и состоит из каркаса, резистора (резисторный элемент на керамическом изоляторе), внешних контактных зажимов. Резисторный элемент выполнен из фехрелевой проволоки. Преимуществом данного материала является то, что он допускает весьма высокие рабочие температуры ($350-400^{\circ}\text{C}$ для прерывисто – продолжительного, кратковременного и повторно – кратковременного режима работы). Внутренние электрические соединения выполнены из неизолированных медных проводников. Изоляция в блоке обеспечивается фарфоровыми цилиндрическими изоляторами. При работе блока резисторов ток через коммутационные выводы протекает по резисторным элементам, выделяемое тепло рассеивается потоками воздуха. К каждому выводу рекомендуется присоединять не более двух проводов (кабелей), оконцованных наконечниками. Блоки должны устанавливаться на горизонтальных поверхностях и надежно крепиться болтами

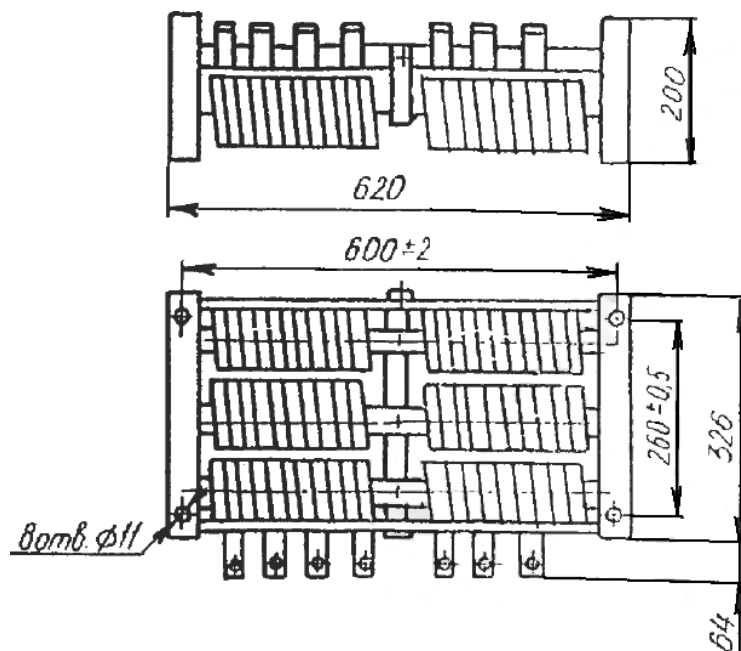


Рисунок 4.4 Общий вид, габаритные и установочные размеры блоков и схема размещения резисторов в блоке.

4.4. Условия эксплуатации

- окружающая среда невзрывоопасная, не пожароопасная, не содержащая газов и паров, разрушающих металл и изоляцию, не содержащая токопроводящей пыли;
- группа механического исполнения МЗ ГОСТ 17516.1-90 без многократных ударов;
- степень защиты IP00 по ГОСТ 14255-69;
- эксплуатация и обслуживание блоков должны производиться в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей»;
- блоки по способу защиты человека от поражения электрическим током относятся к классу 0 по ГОСТ 12.2.007.0-75;
- вероятность возникновения пожара от блока не более 10^{-6} в год.

4.5. Технические данные

Номинальное напряжение:	
постоянного тока	до 440 В;
переменного тока частотой до 60 Гц	до 660В.
Номинальный режим работы	продолжительный
Режим работы	продолжительный, кратковременный, повторно – кратковременный
Масса, не более	20,8 кг.

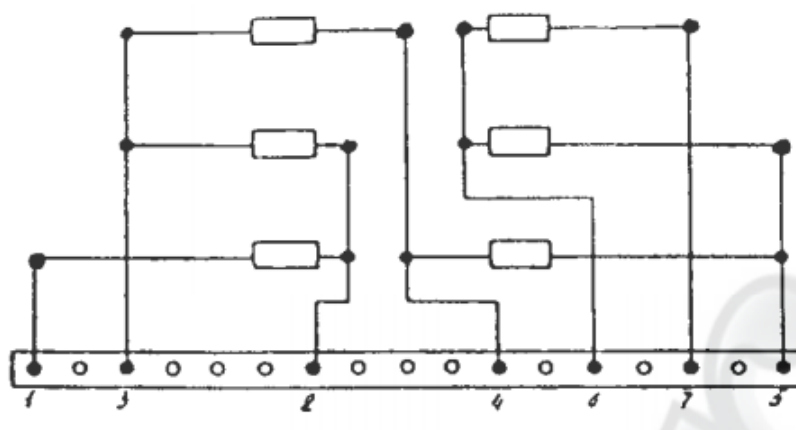


Рисунок 4.5 Электрическая схема блока Б6МУ2 – ИФРЮ.434352.007

Таблица 4.1 Технические данные блока Б6МУ2

Обозначение конструкторского документа	Обозначение ступеней	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7
ИФРЮ.434352.00 7	Сопротивлени е ступеней, Ом	0,135 1- 0,165 1	0,1351 - 0,1651	0,1351 - 0,1651	0,1351 - 0,1651	0,1351 - 0,1651	0,1351 - 0,1651
	Номинальный ток, А	65	65	65	65	65	65

Данный ящик резисторов будет использоваться только для пуска металлургического асинхронного двигателя с фазным ротором.

Для пуска кранового асинхронного двигателя понадобится шесть ящиков резисторов. Соединение внешних контактных зажимов и присоединение к обмоткам ротора производить согласно рисунку 5.3.

При подборе ящика резисторов фактические значения ступеней сопротивлений несколько отличаются от расчетных. Однако суммарное значение всего добавочного сопротивления в соответствии со схемой (рисунок 5.3) составляет 2 Ом, что на 9 % больше чем рассчитанные сопротивления по механическим характеристикам. При этом следует учитывать, что

производственный допуск на суммарное сопротивление резистора составляет $\pm 10\%$ его расчетного значения, а производственный допуск на отдельные ступени составляет до $\pm 15\%$ [1].

5. Проектирование технологического процесса сборки статора асинхронного двигателя

Электротехническая промышленность является материальной основой электрификации страны, автоматизации и механизации производственных процессов, ускорением темпов технического прогресса всех отраслей народного хозяйства. Повышение качества, технического уровня, надежности, долговечности технических изделий – важный фактор роста интенсивности производительности труда в электрической промышленности являются механизация и автоматизация производственных процессов. Производства электрических машин в последние годы характеризуются значительным повышением механизации и автоматизации технологических процессов. Основные промышленные серии машин производятся на специализированных предприятиях с широким использованием автоматических установок и линий. Освоен ряд новых материалов, позволяющих механизировать технологические процессы. Научно-исследовательскими и проектно-технологическими институтами были разработаны типовые технологические процессы и специальные технологические оборудование, что позволяет резко сократить время технологической подготовки производства и трудоемкость выпускаемых изделий. В настоящее время перед технологами стоят задача не только улучшения технологии и технологического оборудования, позволяющих совершенствовать конструкции машин, а также повышение эффективности производства и получения наиболее экономичных изделий.

В задачу технологической части выпускной квалификационной работы (ВКР) входят проектирование технологического процесса сборки статора асинхронного двигателя с фазным ротором.

При этом необходимо оценить технологичность конструкции сборочной единицы, разработать маршрутную технологию, выбрать необходимое оборудование и рассчитать его количество для изготовления 5000 шт/год.

5.1. Анализ исходных данных

Конструкция статора зависит от степени защиты и высоты оси вращения электрической машины. Для асинхронного двигателя закрытого исполнения (IP44) применяют литые чугунные станины, выполненные в виде сравнительно тонкостенной трубы с отлитыми заодно лапами и высокой степенью оребрения.

Станина отливается из чугуна. Этот материал легко поддаётся механической обработке. Требования по твёрдости установлены по ГОСТ 1412-85.

Основными параметрами статора, влияющими на качество машины являются размер и форма отверстия D под сердечник статора, смещение ΔC оси расточки относительно осей отверстий в лапах, отклонение высоты оси расточки относительно опорной плоскости лап (размер h), размер D_1 замков (выточек для посадки подшипниковых щитов) и смещение их оси относительно отверстия сердечника статора, определяемое относительным расположением поверхностей B и Γ .

Размер и форма отверстия D оказывают влияние на плотность посадки сердечника статора, отвод теплоты от него, а также на деформацию сердечника по внутреннему диаметру и как следствие на один из важнейших параметров машины – равномерность воздушного зазора.

Установочные размеры C и h статора определяют пространственное положение оси отверстия относительно опорной плоскости лап и установочный отверстий.

5.2. Служебное назначение и особенности конструкции статора

Статор асинхронного электродвигателя – это индуктор энергии электрического тока в электромагнитную, которая приводит ротор в вращение по закону электромагнитной индукции.

Технологический процесс сборки представляет собой часть производственного процесса, непосредственно связанного с последовательным соединением, взаимной ориентировкой и фиксацией деталей и узлов, для получения готового изделия удовлетворяющего установленным требованиям. Так как в процессе изготовления статора в сборе необходимо обрабатывать опорные поверхности, замковые поверхности, внутреннюю поверхность станины то необходимы токарные и фрезерный станок. Для запрессовки статора в станину необходим гидропресс. Также необходимо предусмотреть ряд вспомогательных инструментов (оправки, захваты, керн, молоток).

Конструкция статора зависит от степени защиты и высоты оси вращения электрической машины. Для асинхронного двигателя закрытого исполнения (IP44) применяют литые чугунные станины, выполненные в виде сравнительно тонкостенной трубы с отлитыми заодно лапами и высокой степенью ребрения.

Станина отливается из чугуна. Этот материал легко поддаётся механической обработке. Требования по твёрдости установлены по ГОСТ 1412-85.

Основными параметрами статора, влияющими на качество машины являются размер и форма отверстия D под сердечник статора, смещение ΔC оси расточки относительно осей отверстий в лапах, отклонение высоты оси расточки относительно опорной плоскости лап (размер h), размер D1 замков (выточек для посадки подшипниковых щитов) и смещение их оси относительно отверстия сердечника статора, определяемое относительным расположением поверхностей В и Г.

Размер и форма отверстия D оказывают влияние на плотность посадки сердечника статора, отвод теплоты от него, а также на деформацию сердечника

по внутреннему диаметру и как следствие на один из важнейших параметров машины – равномерность воздушного зазора.

Установочные размеры C и h статора определяют пространственное положение оси отверстия относительно опорной плоскости лап и установочный отверстий.

Технические требования предъявляемые к станинам:

1. Точность обработки замковых поверхностей по 7-8 качеству;
2. Точность поверхности под статор по 7-8 качеству;
3. Допуск нецилиндричности поверхности под статор не более 0,18 мм;
4. Торцевое биение замковых поверхностей не более 0,02 мм.

Конструкторской и измерительной базами, служат поверхность под запрессовку статора.

5.3. Оценка технологичности конструкции статора

Технологичность конструкции изделия представляет собой совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных показателей качества, объёма выпуска и условий выполнения работ. Статора состоит из станины и сердечника статора.

Конструкция заготовки станины отвечает основным технологическим требованиям, предъявляемым к корпусным деталям:

1. Заготовки имеет определённые углы конусности, для обеспечения разъёма литейных форм, без резких углов и поворотов.
2. Заготовка имеет простое внешнее очертание, плавные переходы от одних поверхностей к другим, а также минимальное число внутренних полостей.

3. Конструкция заготовки обеспечивает направленное затвердевание металла и достаточную сопротивляемость усадочным и термическим напряжениям.

4. Заготовка имеет небольшую массу, форма отливки позволяет уменьшить механическую обработку до минимума.

5. Конструкция обеспечивает технологичность моделей, а также возможность применения простой и унифицированной оснастки.

По сложности конфигурации отливки станины относятся к 3-ей группе сложности – преимущество отливки коробчатой или цилиндрической формы ответственного назначения. По назначению отливки, станины, относятся ко второй группе отливки – деталей, испытываемых на прочность, работающих при статических нагрузках, а также в условиях трения скольжения.

Для получения заготовки принимаем способ литья в кокиль. Этот способ литья деталей из чугуна, стали и цветных сплавов. Отливки имеют мелкозернистую структуру, повышенные механические характеристики, минимальные припуски на механическую обработку.

Преимуществами этого способа литья по сравнению с литьём в песчаные формы является повышенные (на 10-20 %) механические свойства сплавов, более низкая (на 15-20 %) себестоимость процесса, меньшая (в 1,5-2 раза) трудоёмкость труда.

Недостатки – высокая трудоёмкость изготовления металлических форм и стержней станины.

Конструктивное исполнение статора отвечает следующим технологическим требованиям:

- Конструкция статора обеспечивает свободный доступ сборочного инструмента к соответствующим местам соединения деталей.
- В конструкции сборочные единицы исключены необходимость проведения промежуточной разработки и повторной сборки его составных частей.

- В конструкции статора есть базовая деталь (станина), являющаяся основой для установки остальных составных частей. Для обеспечения устойчивости и необходимой точности установки станина наибольшая по габаритам деталь, не деформирующаяся под действием сборочных усилий, имеет развитые базовые опорные поверхности и позволяет проводить сборку в основном без изменения её положения.
- Удобство монтажа и демонтажа.

5.4. Расчет усилий запрессовки статора в станину и выбор оборудования и оснастки для запрессовки

Сердечник статора запрессовывают в корпус на гидравлических прессах. На рисунке 5.1. показана типовая схема запрессовки, которая используется практически на всех заводах.

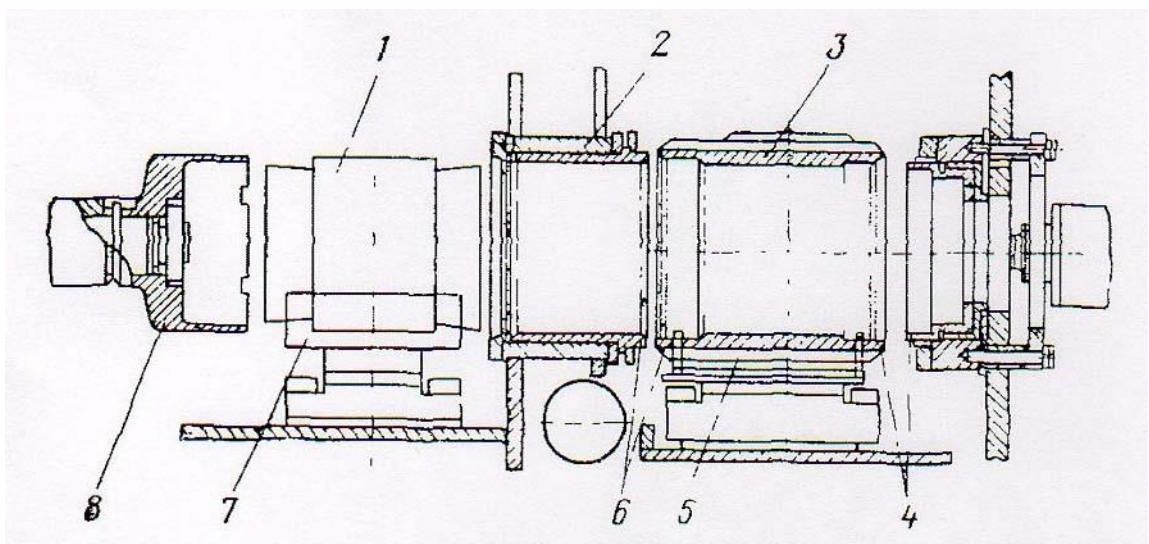


Рисунок 5.1. Схема запрессовки сердечника статора в корпус.

Сердечник статора 1 и корпус 3 устанавливают на стол подачи, сердечник в призму 7, ориентируя по выводным концам, а корпус – на спутник 5. После включения пресса стол подачи перемещается на позицию прессования, где корпус центрируется по замкам 4 и 6 и зажимается. Затем прессующая

головка 8 перемещает сердечник по призме и через направляющую головку 2 запрессовывает его в корпус. Как только сердечник входит во втулку, стол подачи возвращается в исходное положение. По окончании прессования статора освобождается и сталкивается с центрирующего кольца. При переналадке пресса на другую длину изделий необходимо сменить дистанционные и центрирующие кольца. Для лучшей запрессовки на корпус должны быть предусмотрены заходные фаски.

Наиболее часто неподвижные соединения при сборке образуются путём запрессовки соединяемых деталей.

Исходные данные:

$D=420$ мм – наружный диаметр станины

$d=400$ мм – наружный диаметр сердечника статора

$d_0=292$ мм – внутренний диаметр сердечника статора

$\varnothing 400H7(^{+0.290})$ мм – диаметр отверстия в станине

$\varnothing 400m8(^{+0.356}_{+0.284})$ мм – диаметр сердечника статора под напрессовку в станину

$L=150$ мм – осевая длина сердечника статора

$E_1=2.1 \cdot 10^5$ Н/мм² – модель Юнга для стали

$E_2=1 \cdot 10^5$ Н/мм² – модель Юнга для чугуна

$\mu_1=0.3$ – коэффициент Пуассона для стали

$\mu_2=0.25$ – коэффициент Пуассона для чугуна

$R_{a1}=0.8$ мкм – шероховатость сопрягаемой поверхности стали

$R_{a2}=0.8$ мкм – шероховатость сопрягаемой поверхности чугуна

Прочность и неподвижность таких соединений обеспечивается силами трения, которые определяются величиной давления, созданного натягом [9, с. 200]:

$$p = \frac{1}{d} \cdot \frac{\delta_p \cdot 10^{-3}}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}}, \text{ МПа}$$

где $\delta_p = \delta_{\max} - 1.2 \cdot (R_{a1} + R_{a2})$ – расчётный натяг в соединении деталей, мкм

C_1 и C_2 – безразмерные коэффициенты, вычисляемые по формулам [9, с. 200]:

$$C_1 = \frac{d^2 + d_0^2}{d^2 - d_0^2} + \mu_1 \quad \text{и} \quad C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2$$

Находим безразмерные коэффициенты:

$$C_1 = \frac{400^2 + 292^2}{400^2 - 292^2} + 0.3 = 3.58; \quad C_2 = \frac{420^2 + 400^2}{420^2 - 400^2} + 0.25 = 20.76$$

Найдём расчётный натяг δ_p . для этого рассчитаем максимальный натяг в соединении $\delta_{\max}$ по формуле:

$$\delta_{\max} = es_c - EI_k = 356 - 0 = 356 \text{ мкм}$$

где $es_c = 356$ мкм – верхнее предельное отклонение диаметра наружного ярма сердечника статора

$EI_k = 0$ мкм – нижнее предельное отклонение диаметра внутреннего диаметра станины

$$\delta_p = 356 - 1.2 \cdot (0.8 + 0.8) = 354.08 \text{ мкм}$$

Найдём величину давления, создаваемого натягом:

$$p = \frac{1}{400} \cdot \frac{354.08 \cdot 10^{-3}}{\frac{3.58}{2.1 \cdot 10^5} + \frac{20.76}{1 \cdot 10^5}} = 3.939 \text{ МПа}$$

Для запрессовки необходимо приложить к сопрягаемым деталям усилие, возрастающее от 0 до наибольшего значения [9, с. 200]:

$$P = f_3 \cdot \pi \cdot d \cdot L \cdot p = 0.13 \cdot 3.14 \cdot 400 \cdot 150 \cdot 3.939 = 96.544 \text{ кН}$$

где $f_3 = 0.13$ – коэффициент трения [9, табл. 3, с. 201]

Выбираем: пресс гидравлический П7320 усилием 100 кН

Таблица 5.1. Технические характеристики гидравлического пресса П7320

Номинальное усилие пресса, кН	100
Ход ползуна пресса, мм	400
Наибольшее растяжение между столом и ползуном, мм	600
Размеры стола: слева – направо, мм	380
Размеры стола: спереди – назад, мм	500
Скорость холостого хода ползуна, мм/с	180
Скорость рабочего хода ползуна, мм/с (регулируемая)	100
Мощность привода, кВт	12.5
Габаритные размеры (без механизации), мм	
Слева – направо	1850
Спереди – назад	600
Высота машины	1250
Масса пресса, не более, кг	920

Согласно маршрутной технологии составим схему сборки статора, которая представлена на рисунке 5.2.

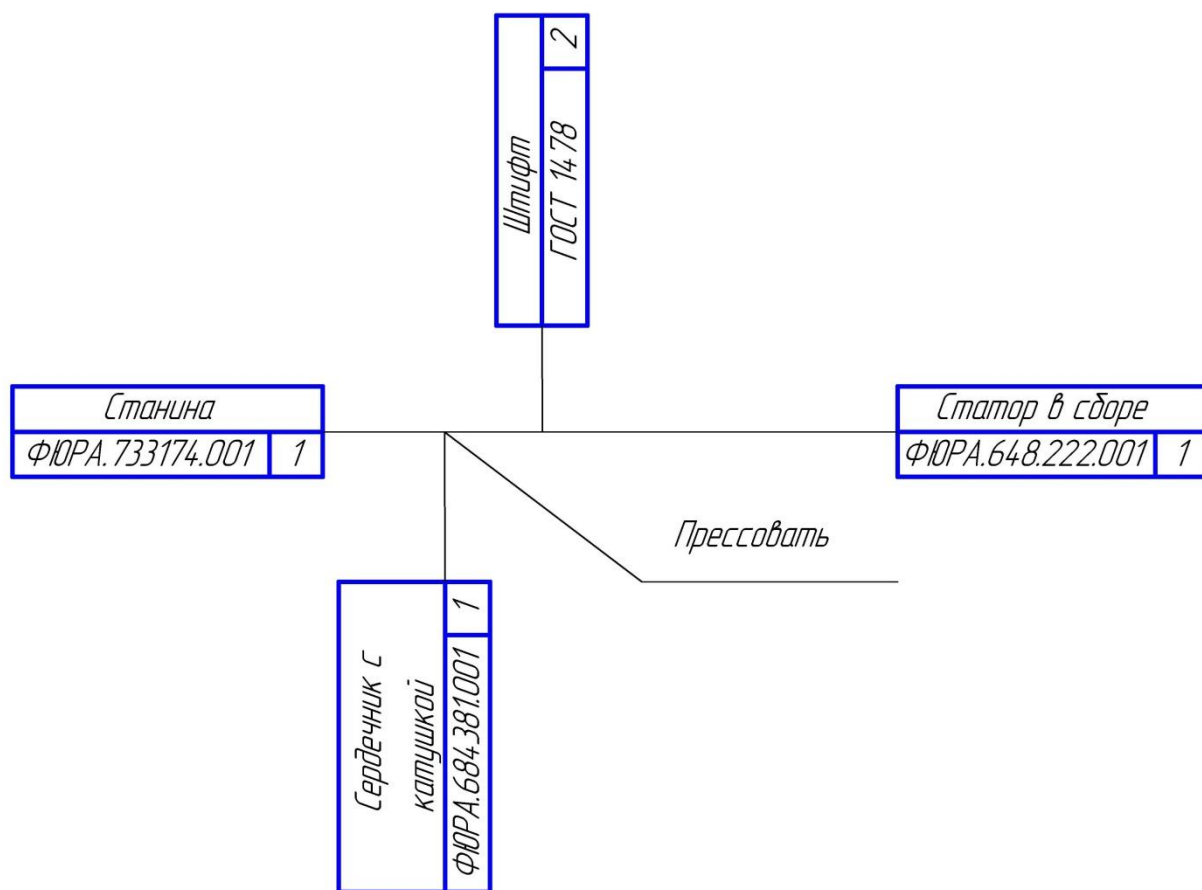


Рисунок 5.2. Схема сборки статора

5.5. Выбор технологического оборудования и оснастки

При изготовлении статора необходимо следующее оборудование:

1. Пресс гидравлический П7320. Запрессовочный станок. Для запрессовки используется запрессованный станок, с установкой необходимыми параметрами запрессовки
2. Токарно – винтовой станок 16K20. Станок предназначен для чистовой обработки внутреннего диаметра статора и замковых поверхностей.
3. Продольно – фрезерный станок 6305. Станок предназначен для чистовой обработки поверхностей лип.

Для сборки статора на прессе необходимо стальное приспособление, которое имеет форму втулки, с размерами $\varnothing 400/390 \times 160$. Приспособление ставится заподлицо в внутрь станины с обратной стороны запрессовки и служит ограничителем захода сердечника статора, т.е. обеспечивает поядку сердечника в корпус на требуемую глубину. Расположение втулки для запрессовки сердечника статора показано на рисунке 5.3.

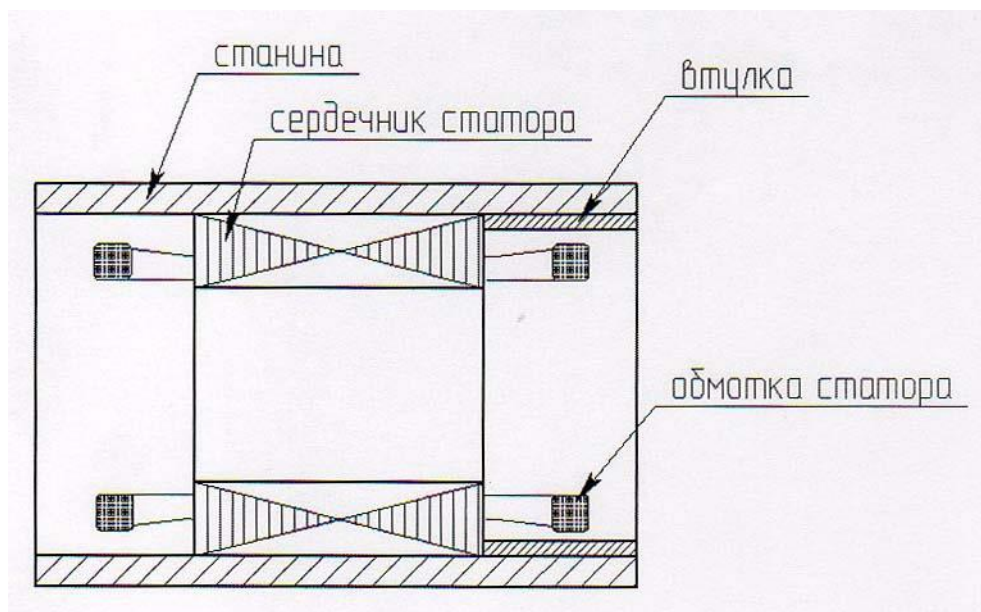


Рисунок 5.3. Расположение втулки для запрессовки сердечника статора

5.6. Техническое нормирование операций

$T_o=0.1$ мин – основное (техническое) время [10, табл. 5.1, с. 197];

$T_{yc}=0.22$ мин – время на установку и снятия детали [10, табл. 5.1, с. 197];

$T_{zo}=0.024$ мин – время на закрепление и открепление детали [10, табл. 5.7, с. 201];

$T_{yn}=0.02$ мин – время на приём управления (включить и выключить станок рычагом) [10, табл. 5.8, с. 202];.

$T_{из}=0.03$ мин – время на измерение детали [10, табл. 5.12, с. 207];

Эти данные получены для массового производства. Для серийного производства учёт коэффициент 1.85. тогда вспомогательное время будет равно.

$$T_{\text{в}} = 1.85 \cdot (T_{\text{ус}} + T_{\text{зо}} + T_{\text{уп}} + T_{\text{из}}) = 1.85 \cdot (0.22 + 0.024 + 0.02 + 0.03) = 0.544 \text{ мин}$$

$$\text{Оперативное время } T_{\text{оп}} = T_{\text{o}} + T_{\text{в}} = 0.1 + 0.544 = 0.644 \text{ мин}$$

Процент времени на обслуживание и отдых оперативного $P_{\text{об.от}} = 7\%$ для токарного станка при высоте центров от 300 мм [10, табл. 6.1, с. 214];

Время на обслуживание оборудования и отдых

$$T_{\text{об.от}} = T_{\text{оп}} \cdot P_{\text{об.от}} / 100 = 0.64 \cdot 7 / 100 = 0.045 \text{ мин}$$

Время подготовительно – заключительное $T_{\text{пз}} = 14$ мин для токарного станка с высотой центров до 300 мм при закреплении заготовки в самоцентрирующем пневматическом патроне.

При серийном производстве изделия выпускаются месячными партиями. При заданной годовой программе $N = 5000$ шт., количество изделий в партии $n = 417$.

Определим штучно – калькуляционное время [10, табл. 6.3, с. 215];.

$$T_{\text{шт.к}} = T_{\text{оп}} + T_{\text{об.от}} + T_{\text{пз}} / n = 0.64 + 0.045 + 14 / 334 = 0.73 \text{ мин}$$

Исходя их полученных расчетов, определим параметры для каждой операции и занесём данные в таблицу 5.2.

Таблица 5.2. Расчет норм времени

Операция	T _о , мин	T _{ус} , мин	T _{зо} , мин	T _{уп} , мин	T _{из} , мин	T _в , мин	T _{пз} , мин	T _{оп} , мин	T _{об.от} , мин	T _{шт.к} , мин
Черновое расточка замка	0.10	0.22	0.2	0.2	0.03	0.54	14	0.64	0.04	0.73
Чистовое расточка замка	0.02	0.22	0.02	0.02	0.03	0.54	14	0.56	0.04	0.65
Точное расточка замка	0.01	0.22	0.02	0.02	0.03	0.54	14	0.55	0.04	0.64
Фрезерование поверхности лип	0.54	0.20	0.02	0.1	0.05	0.51	12	1.05	0.06	1.15
Фрезерование плоскости под коробку контактных зажимов	0.27	0.20	0.02	0.01	0.05	0.42	12	1.05	0.06	0.77
Запрессовка сердечника с катушкой в корпус статора	0.30	0.20	0.07	0.03	0	0.56	5	0.86	0.07	0.95

5.7. Расчет количества оборудования для выполнения годовой программы

Для определения потребного количества оборудования необходимо знать объем выпуска изделий (в нашем случае 5000 шт/год), суммарные нормы времени по каждому виду оборудования и эффективный годовой фонд производственного времени оборудования, который при сорокачасовой неделе можно рассчитать по формуле:

$$F_d = [(365 - B_d - П_d) \cdot 8 - П_{пд}] \cdot z \cdot K_p = \\ = [(365 - 104 - 11) \cdot 8 - 9] \cdot 1 \cdot 0.96 = 1911 \text{ ч}$$

где $B_d=104$ – количество выходных дней в году

$П_d=11$ – количество праздничных дней в году

$П_{пд}=9$ – количество предпраздничных дней в году

$K_p=0.96$ – для средних (массой до 10 т) – коэффициент учитывающий время пребывания единицы оборудования в ремонте

$z=1$ – число смен работы оборудования

Расчетное число каждого из видов сборочного оборудования:

$$C_p = \frac{T_{шт.к} \cdot N}{60 \cdot F_d}$$

где $N=5000$ шт/год – годовой программе выпуска

$T_{шт.к}$ – сумма $T_{шт.к}$ для единицы оборудования

Коэффициент загрузки оборудования:

$$K_z = \frac{C_p}{C_n} \cdot 100\%$$

где C_n – принятое число оборудования, получается округлением расчетного в большую сторону

Расчет коэффициента загрузки для каждого оборудования.

1. Токарно – винтовой станок:

$$C_p = \frac{[2 \cdot (0.73 + 0.65 + 0.64)] \cdot 5000}{60 \cdot 1911} = 0.176$$

$$K_3 = \frac{0.176}{1} \cdot 100 = 17.6$$

2. Продольно – фрезерный станок

$$C_p = \frac{[2 \cdot (0.77 + 1.15 + 1.12)] \cdot 5000}{60 \cdot 1911} = 0.265$$

$$K_3 = \frac{0.265}{1} \cdot 100 = 26.5$$

3. Горизонтально – прессовочный станок

$$C_p = \frac{0.95 \cdot 5000}{60 \cdot 1911} = 0.041$$

$$K_3 = \frac{0.041}{1} \cdot 100 = 4.1$$

Занесем полученные результаты в таблицу 5.3.

Таблица 5.3. Данные загрузки оборудования

Оборудование	C_p	C_{Π}	K_3
Токарно – винтовой станок	0.176	1	17.6
Продольно – фрезерный станок	0.265	1	26.5
Горизонтально – прессовочный станок	0.041	1	4.1

По данным таблицы 5.3. построим диаграмму, показывающую коэффициенты загрузки для различных типов оборудования.

Проверим, выполняется ли годовая программа выпуска статора. Для этого возьмём самое загруженное оборудование и рассчитаем по формуле

$$N = \frac{60 \cdot F_d \cdot C_{\Pi}}{T_{шт.к}} = \frac{60 \cdot 1991 \cdot 1}{2 \cdot (0.77 + 1.15 + 1.12)} = 19648 \frac{\text{шт}}{\text{год}}$$

Таким образом 4666 больше 4000. Программа выпуска выполняется.

В результате проведённого технологического процесса сборки статора, мы исследовали маршрутную технологию, рассчитали необходимое количество оборудования при заданной программе выпуска $N=5000$ шт/год.

Все операции сборки статора описаны в маршрутной карте

6. Смета затрат на проектирование

В проектировании данного электродвигателя принимали участие два инженерных работника: научный руководитель и инженер-студент.

Распределение работы между работниками, проектирующими сводим, в таблицу 6.1

Таблица 6.1 – План разработки выполнения этапов проекта.

№	Перечень выполняемых работ	Исполнители	Продолж. (дней)
п/п			
1	Составление и утверждение ТЗ.	Научный руководитель	1
		Инженер	
2	Подбор и изучение материалов по теме.	Инженер	2
3	Проектирование модели.	Инженер	3
4	Электромагнитный расчет синхронного генератора.	Инженер	8
5	Проверка полученных результатов	Научный руководитель	2
		Инженер	
6	Подготовка и составление схем, чертежей	Инженер	3
7	Расчет технологической части проекта	Инженер	3
8	Расчет экономической составляющей проекта.	Инженер	2
9	Составление раздела по социальной ответственности	Инженер	2
10	Оформление расчетно-пояснительной записки	Инженер	1
11	Проверка расчетно-пояснительной записки и чертежей	Научный руководитель	1
		Инженер	
Длительность работы, дней			28

Итого научный руководитель занят 4 дня, инженер студент 28 дней.

По данным таблицы 6.2 построим график занятости исполнителей.

Табл. 6.2 – График занятости исполнителей

№ раб	Перечень выполняемых работ	Исполнитель	Дни для выполнения проекта																											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
1	Составление и утверждение технического задания	Научный руководитель																												
		Инженер																												
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер																												
3	Проектирование модели	Инженер																												
4	Электромагнитный расчет двигателя	Инженер																												
5	Проверка полученных результатов	Научный руководитель																												
		Инженер																												
6	Подготовка и составление схем, чертежей	Инженер																												
7	Расчет технологической части	Инженер																												
8	Расчет экономической составляющей проекта.	Инженер																												
9	Составление раздела по социальной ответственности	Инженер																												
10	Оформление расчетно- пояснительной записки	Инженер																												
11	Проверка пояснительной записки и чертежей	Научный руководитель																												
		Инженер																												

6.1 Смета затрат на подготовку проекта

Суммарные издержки на проектирование определяем по выражению:

$$\sum I_{\text{проекта}} = I_{\text{з.пл}} + I_{\text{соц}} + I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{накл}},$$

где $I_{\text{з.пл}}$ - издержки на заработную плату;

$I_{\text{соц}}$ - издержки на социальные отчисления;

$I_{\text{мат}}$ - материальные издержки;

$I_{\text{ам}}$ - амортизационные издержки;

$I_{\text{пр}}$ - прочие издержки;

$I_{\text{накл}}$ - накладные расходы.

Издержки на заработную плату представлены в таблице 6.3, при этом научный руководитель занимает должность ассистента и имеет степень кандидата технических наук.

Таблица 6.3 – Расчет ЗП с учетом занимаемой должности

Должность	Оклад	Доплата	коэффициент за отпуск	коэффициент районный	Итоговая зарплата за	Средняя зарплата за один день, руб.	дней работы над проектом	ФЗП
Научный руководитель	14500	2200	1,1	1,3	23595	1123,571	4	4 494,29
Инженер	14500		1,1	1,3	20735	987,381	28	27 646,67
Итого					77363	3684		32 140,95

$$И_{з.пл.} = \frac{(3 \cdot k_1 + Д) \cdot k_2}{21} \cdot X \quad \text{или} \quad И_{з.пл.} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X$$

где: 3 –оклад;

Д – доплата за интенсивность труда

k_1 - коэффициент за отпуск (1,1);

k_2 - районный коэффициент (1,3);

21 - количество рабочих дней в месяце;

X - количество рабочих дней затраченных на проект (3 дня).

Зарплата.

Расчет для научного руководителя 15 разряда

$$И_{з.пл.} = \frac{(3 \cdot k_1 + Д) \cdot k_2}{21} \cdot X = \frac{(14500,00 \cdot 1,1 + 2200) \cdot 1,3}{21} \cdot 4 = 4494,29 \text{ (руб.)}$$

Расчет для инженера разряда

$$И_{з.пл.} = \frac{(3 \cdot k_1 \cdot k_2)}{21} \cdot X = \frac{14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3}{21} \cdot 28 = 27646,67 \text{ (руб.)}$$

Тогда

$$И_{з.пл\Sigma} = \sum И_{з.пл} = 4494,29 + 27646,67 = 32140,95 \text{ (руб.)}$$

6.2 Отчисления на социальные нужды.

В статью расходов «отчисления на социальные нужды» закладывается обязательные отчисления по установленным законодательством нормам. Органам государственного социального страхования, пенсионного фонда,

государственного фонда занятости и медицинского страхования, от элемента «затраты на оплату труда». Размер отчислений на социальные нужды составляет 30% от ФЗП.

$$I_{соц} = 0,3 \cdot I_{з.пл.С} = 0,3 \cdot 32140,95 = 9642,29 \text{ (руб.)}$$

6.3 Материальные затраты на канцелярские товары.

Материальные затраты на канцелярские товары примем в размере 1100 руб. (в условиях цен на канцелярские товары в настоящее время).

$$I_{mat} = 1100 \text{ (руб.)}$$

6.4 Амортизация вычислительной техники.

Проект был выполнен на персональном компьютере первоначальной стоимостью 21000 рублей.

Произведём расчёт амортизации стоимости ПК

$$I_{ам} = \frac{T_u}{T_{кал}} \cdot \Phi_{кт} \cdot H_{\phi} = \frac{28}{365} \cdot 21000 \cdot \frac{1}{7} = 230,14 \text{ (руб)}$$

где T_u - количество отработанных дней на ПК;

$T_{кал}$ - количество календарных дней в году;

$\Phi_{кт}$ - первоначальная стоимость ПК;

$H_{\phi} = \frac{1}{T_{сл}}$ - срок полной амортизации.

6.5 Прочие неучтенные затраты.

Прочие неучтенные прямые затраты включают в себя все расходы связанные с налоговыми сборами (не предусмотренными в предыдущих статьях), отчисления внебюджетные фонды, платежи по страхованию, оплата услуг связи, представительские расходы, затраты на ремонт и прочее. Принимаем размер прочих затрат как 12% от суммы расходов на материальные затраты, услуги сторонних организаций, амортизации оборудования, затрат на оплату труда, отчисления на социальные нужды.

$$I_{пр} = 0,2 \cdot (I_{з.пл} + I_{соц} + I_{мат} + I_{ам}) = 5173,61 (\text{руб})$$

6.6 Накладные расходы.

Накладные расходы составят 200% от ФЗП. Включают в себя затраты на хозяйственное обслуживание помещения, обеспечение нормальных условий труда, оплату за энергоносители и другие косвенные затраты.

$$I_{накл} = 2 \times I_{з.пл} = 2 \cdot 32140,95 = 64281,90 (\text{руб})$$

6.7 Себестоимость проекта

$$\begin{aligned} \sum I_{\text{проекта}} &= I_{з.пл} + I_{соц} + I_{мат} + I_{ам} + I_{пр} + I_{накл} = \\ &= 32140,95 + 9642,29 + 1100 + 230,14 + 5173,61 + 64281,90 = 112568,88 (\text{руб}) \end{aligned}$$

Результаты расчетов сведем в таблицу 6.4.

Таблица 6.4 – Смета затрат на подготовку проекта

№ п/п	Наименование	Обозначение	Сумма, руб.
1	Заработная плата	$I_{з.пл}\Sigma$	32 140,95
2	Социальные отчисления	$I_{соц}$	9642,29
3	Материальные затраты	$I_{мат}$	1100,00
4	Амортизационные отчисления	$I_{ам}$	21000,00
5	Прочие издержки	$I_{пр}$	230,14
6	Накладные расходы	$I_{накл}$	5173,61
7	Себестоимость проекта	$\Sigma I_{проекта}$	64281,90

6.8 Оценка технического уровня

Технический уровень оценивается путем сопоставления технико-экономических показателей изделий с лучшими отечественными и зарубежными образцами аналогичной техники. При этом оценка проводится по основным технико-экономическим показателям, характеризующим важнейшие свойства изделий.

Общей схемой количественного анализа конкурентоспособности, которая может применяться на любом этапе существования изделий, является следующая:

1. Выбор базового образца, аналогичного по назначению и условиям эксплуатации с оцениваемой продукцией.

2. Определение перечня нормативных, технических и экономических параметров, подлежащих исследованию.

3. Сравнение (по каждой из групп параметров) имеющихся параметров с соответствующими параметрами потребности, необходимыми для заказчика (потребителя). Инструментом сравнения является единичный показатель,

представляющий собой отношение величины параметра рассматриваемого изделия к величине этого же параметра, необходимого покупателю.

4. Подсчет группового показателя на основе единичных показателей. Групповой показатель выражает различие между анализируемыми изделиями по всем группам параметров в целом.

Любое проектирование в идеале должно начинаться с выявления потребностей потенциальных покупателей. После такого анализа становится возможным вычислить единичный параметрический показатель.

$$q = \frac{p}{p_{100}} p$$

где q - параметрический показатель;

P - величина параметра реального изделия;

P_{100} - величина параметра гипотетического изделия, удовлетворяющего потребность на 100%;

p - вероятность достижения величины параметра; вводится для получения более точного результата с учетом элемента случайности, что позволяет снизить риск осуществления проекта.

Каждому параметрическому показателю по отношению к изделию в целом (т.е. обобщенному удовлетворению потребности) соответствует некий вес d , разный для каждого показателя. После вычисления вычисления всех единичных показателей становится реальностью вычисление обобщенного (группового показателя), характеризующего соответствие изделия потребности в нем (полезный эффект товара)

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i d_i$$

где Q - групповой технический показатель (по техническим параметрам); q_i - единичный параметрический показатель по i -му параметру;

d_i - вес i -го параметра; n - число параметров, подлежащих рассмотрению.

Показатель конкурентоспособности нашего изделия по отношению к изделию другой фирмы k_w будет равен

$$k_{\text{ТП}} = \frac{Q_H}{Q_K}$$

где $k_{ТП}$ - показатель конкурентоспособности нового изделия по отношению к конкурирующему по техническим параметрам;

$Q_H Q_K \sim$ соответствующие групповые технические показатели нового и конкурирующего изделия.

Промышленная продукция, которая по показателям технического уровня и качества превосходит лучшие отечественные и зарубежные достижения или соответствует им, определяет технический прогресс, обеспечивает значительное повышение производительности труда, экономию материалов, топлива и электроэнергии, экологически безопасна, удовлетворяет потребности населения страны, и конкурентоспособна на внешнем рынке. Эта продукция должна характеризоваться стабильностью показателей технического уровня и качества, основанной на строгом соблюдении технологической дисциплины и высокой культуре производства. На продукцию высшей категории качества изготовителем должны обеспечиваться повышенные гарантии надежности, безопасности и других важнейших показателей качества.

Промышленная продукция, которая по показателям технического уровня и качества соответствует современным требованиям стандартов (технических условий), экологически безопасна, удовлетворяет потребности народного хозяйства и населения страны, характеризуется стабильностью показателей технического уровня и качества, основанной на строгом соблюдении технологической дисциплины и высокой культуре производства.

Промышленная продукция, которая по показателям технического уровня и качества не соответствует современным требованиям народного хозяйства и населения страны, морально устарела и подлежит модернизации или снятию с производства.

Данные для оценки конкурентоспособности разрабатываемого новшества привести в таблице.

Таблица 6.5 – Оценка технического уровня новшества.

Характеристики	Вес показателей	Новшество		Конкурент		Гипотетический образец	
	d _i	P _i	q _i	P _i	q _i	P ₁₀₀	Q ₁₀₀
Коэффициент полезного действия, %	0,185	87	0,916	85	0,895	95	1
Коэффициент мощности Cosφ, %	0,154	74	0,925	72	0,900	80	1
Пусковой ток, А	0,185	40	0,889	42	0,933	45	1
Пусковой момент, Н*м	0,200	33	0,825	30	0,750	40	1
Номинальный ток, А	0,154	5,4	0,982	5,4	0,982	5,5	1
Степень защиты IP	0,123	65	0,765	70	0,824	85	1
Итого			0,886		0,878		1

Таблица 6.6 – Матрица предпочтений

№ п/п	Наименование	1	2	3	4	5	6	сумма	d _{ij}
1	Коэффициент полезного действия	1	1,5	1	0,5	1	1	6	0,185
2	Коэффициент мощности Cosφ	0,5	0,5	1,5	1	0,5	1	5	0,154
3	Пусковой ток	1,5	1	1	0,5	1	1	6	0,185
4	Пусковой момент	1,5	1	0,5	1	1	1,5	6,5	0,200
5	Номинальный ток	1	1	0,5	1,5	0,5	0,5	5	0,154
6	Степень защиты	0,5	0,5	0,5	1	0,5	1	4	0,123

В итоге по оценке конкурентоспособности новшества видно, что разработанный товар не уступает товарам заменителям и коэффициент технического уровня $k_{\text{тп}} = 0,886/0,878 = 1,008$.

7. Социальная ответственность

В данном разделе рассмотрим безопасность и экологичность технологического процесса изготовления и сборки статора асинхронного двигателя. Безопасность жизнедеятельности представляет собой систему законодательных актов и соответствующих им социально-экономических, технических, гигиенических, организационных мероприятий, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда [19].

На данном участке выполняются следующие виды работ: работа с ручным инструментом, настройке работы оборудования, работа с транспортными приспособлениями.

Для осуществления технологического процесса сборки статора применяется следующее оборудование: стол поворотный, кран-балка, радиально-сверлильный станок, токарно-винторезный станок, токарно-карусельный станок, продольно-фрезерный станок, гидравлические приспособления, верстак цеховой, сверла различного диаметра, резцы, и др.

7.1 Анализ опасных и вредных факторов

При сборке статоров асинхронного двигателя возникает ряд вредных и опасных производственных факторов.

Опасные факторы, возникающие при данном технологическом процессе:

- Поражение электрическим током, при работе испытательной станции.
- Получение механических травм, при слесарно сборочных работах.
- Получение ожогов при пожаре, вследствие повреждения электропроводки и электрооборудования в целом.

Наряду с опасными факторами можно выделить вредные факторы, которые приводят к нарушению нормального режима работы. К ним относятся:

- Отклонение параметров микроклимата на участке общей сборки асинхронного двигателя от установленных норм.

- Шум при работе с ручным механизированных инструментом.
- Образование вредных веществ.
- Недостаточная освещенность рабочей поверхности.

7.2. Техника безопасности

7.2.1 Общие правила

Наиболее вероятную опасность при работе на станках составляет втягивание одежды во вращающиеся части станков в случае отсутствия защитного ограждения. В связи с этим на участке сборки статора запрещается работать на неисправном оборудовании, со снятием ограждения, производить ремонт и настройку станка при его работе. Одежда должна быть подобрана по размеру и застегнута так, чтобы не было свободно развивающихся концов. Волосы должны быть убраны под головной убор. Запрещается также снимать и надевать одежду возле работающего станка [20].

Также рабочий на участке может пострадать в случае загромождения своего рабочего места. Поэтому готовую продукцию рабочий должен складировать в определенном месте и таким образом, чтобы не было возможных падений элементов и нагромождений проходов.

В процессе работы на токарных и сверлильных станках образуется стружка, которая отлетает и может служить причиной травмирования.

Общие требования:

К самостоятельной работе на участке изготовление и сборки статора допускается лица прошедшие аттестацию в квалификационной комиссии и инструктаж по охране труда на рабочем месте и имеющие группу допуска не ниже 3.

Первичных инструктаж рабочий получают на рабочем месте до начала производственной деятельности.

Рабочий должен работать в спецодежде.

Необходимо соблюдать:

- правила внутреннего распорядка;
- правила личной гигиены (работать в спецодежде);
- курить только в специально отведенных местах;
- соблюдать производственную и технологичную дисциплину, при работе быть внимательным.

При получении травмы или недомогании нужно немедленно обратиться в здравпункт и сообщить мастеру или начальнику цеха.

7.2.2. Электробезопасность

Согласно ПУЭ цеха, в котором производится сборка статора, относится, к помещению с повышенной опасностью поражения людей электрическим током, т.к. имеется токопроводящий железобетонный пол. Необходимо применять определенный комплекс защитных мер, обеспечивающих достаточную электробезопасность [21].

Во избежание поражения рабочего электрическим током согласно ПУЭ все токоведущие части на участке изолированы и закрыты. Конструкция станков предусматривает заземление, сопротивление которого не должно превышать 4 Ом (установки до 1000 В) [22].

Для снижения опасности поражения электрическим током, рабочие носят обувь на резиновой подошве, на рабочих местах предусмотрены резиновые защитные коврики.

Оборудование на участке (станки, механизированный ручной инструмент), предоставляет для человека большую потенциальную опасность, так как в процессе эксплуатации или при проведении профилактических работ человек может коснуться частей, находящий под напряжением.

Применение только одного организационных и технических мероприятий по предупреждению поражения электрическим током не может в полной мере обеспечить необходимость при эксплуатации электроустановок. Это возможно, если наряду с выполнением предписанных ПТЭ и ПТБ потребителей

организационных защитных мер использовать технические средства защиты, к которым относят: электрическую изоляцию токоведущих частей, защитное заземление, зануление ГОСТ 12.1.038.-82, выравнивание потенциалов, защитное отключение, электрическое разделение сети, малое напряжение, двойную изоляцию. Использование этих средств в различных сочетаниях позволяет обеспечить защиту людей от прикосновения к токоведущим частям, от опасности перехода напряжения на металлические нетоковедущие части.

7.3. Производственная санитария

Под производственной санитарией понимается система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих или уменьшающих воздействие, на работающих производственных факторов.

Для создания приемлемых условий труда необходимо учесть ряд моментов. Во-первых, необходимо микроклимат в помещении соответствовал установленным нормам. Во-вторых, необходимо следить за уровнем шума в помещении.

Немаловажным фактором обеспечения требуемых условий труда является наличие правильно спроектированного освещения. Основное назначение освещения на производстве – наилучших условий для работы зрительного аппарата человека. На участке механической обработки подшипниковых щитов освещение искусственное, которое обеспечивает электрическими источниками света.

7.3.1. Шум и вибрация

В результате гигиенических исследований установлено, что шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека.

Шум неблагоприятно воздействует на организм человека, технические и физиологические нарушения, снижает работоспособность и создаёт предпосылки для общих профессиональных заболеваний и производственного травматизма.

При длительном воздействии шума на организм человека происходят такие явления как снижение остроты зрения и слуха, повышение кровяного давления, снижение внимания.

Продолжительный шум стать причиной функциональных изменений сердечнососудистой и нервной систем. С целью проверки соответствия уровня шума требованиям санитарных норм производят его измерение. На основании замеров производится разработка мероприятий по борьбе с шумом. Для оценки шума используют частотный спектр измеренного уровня звукового давления, выраженного в децибелах в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром [23].

Сильно продолжительный шум может быть причиной функциональных изменений сердечно сосудистой и нервной систем. Измерение шума проводят с целью его на рабочих местах или рабочих зонах для сопоставления с требованиями санитарных норм, а также для оценки шумовых характеристик машин и оборудования, с целью разработки мероприятий по борьбе с шумом. Для оценки шума используют частотный спектр измеренного уровня звукового давления, выраженного в децибелах в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром. Большое влияние на умственную работу оказывают звуковые раздражители. Они затрудняют сосредоточение внимания, оказывают неблагоприятное воздействие на здоровье человека, изменяют нервные процессы, вызывают утомляемость, затрудняют прием и восприятие информации. Согласно санитарным нормам [24] установлены нормы шума на рабочих местах.

На данном участке, при выполнении мероприятий по сокращению проникновения шумов с улицы, световые проёмы целесообразно закладывать стеклоблоками.

В таблице 7.1. приведены уровни звукового давления, измеренные восьми октановых полосах со среднегеометрическими частотами для постоянных рабочих мест в производственных помещениях.

Таблица 7.1. Допустимые уровни звукового давления и эквивалентного звука

	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентн ые уровни звука, дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Рабочие места										
Постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственн ых помещениях	107	95	87	82	78	75	73	71	69	80

Вредным производственным фактором является вибрация механические колебания твёрдых тел, передаваемые организму человека. Они могут быть причиной расстройства сердечнососудистой и нервной системы, а также опорно двигательной системы человека. Измерение вибрации производится прибором ВШВ-003, снабженным микрофоном и датчиком вибрации.

Источником вибрации являются различные технологические процессы, механизмы, машины и их рабочие органы.

Вибрация неблагоприятно воздействует на организм человека, особенно если частота ее колебаний совпадает с частотой резонанса всего организма человека или некоторых органов. Измерение вибраций производится в соответствии с требованиями ГОСТ 12.1.012-2004.

Колебания с частотой 16-20 Гц ощущаются как звук и вибрация. В производственных условиях ощущаются в основной 35-250 Гц. Вибрация характеризуется: частотой колебания, амплитудой смещения, колебательной скоростью, колебательным ускорением. Вибрация может быть общей или локальной. Локальная – при работе с ручным инструментом. Общая вибрация ведёт к поражению сердечнососудистой системы, вестибулярного аппарата. Опасная вибрация на частоте 6 – 9 Гц.

Данный цех по санитарным нормам вибрации относится к категории 3-технологической типа «А». Нормы на вибрацию приведены в таблице 7.2.

Для помещений, предназначенных для установки слесарно-обрабатывающего оборудования, исключение возможной вибрации достигается путем увеличения массы фундамента рабочей площадки, устранение жестких связей между фундаментом оборудования и рабочей площадкой, облицовкой листов покрытия пола вибродемпфирующими материалами.

Таблица 7.2. Санитарные нормы вибрации категории 3 – технологической типа «А»

Средне-геометрические частоты полос	Допустимые значения по осям x_0 , y_0 , z_0							
	виброускорения				виброскорости			
	м/с ²		дБ		м/с×10 ⁻²		дБ	
	1/3 окт.	1/1 окт.	1/3 окт.	1/1 окт.	1/3 окт.	1/1 окт.	1/3 окт.	1/1 окт.
1,6	0,090		49		0,90			
2	0,080	0,14	48	53	0,63	1,30	102	108
3,15	0,063		46		0,32			
4	0,056	0,10	45	50	0,22	0,45	93	99
5	0,056		45		0,18			
6,3	0,056		45		0,14			
8	0,56	0,10	45	50	0,11	0,22	37	93
10	0,071		47		0,11			
12,5	0,090		49		0,11			
16	0,112	0,20	51	56	0,11	0,20	37	92
20	0,140		53		0,11			
25	0,180		55		0,11			
31,5	0,224	0,40	57	62	0,11	0,20	37	92
40	0,280		59		0,11			

50	0,355		61		0,11	0,20		
63	0,450	0,30	63	68	0,11		37	92
80	0,560		65					
Корректированные и эквивалентные корректированные значение значения и их уровни		0,10		50		0,20		92

7.3.2. Психологические факторы

Утомление – это процесс понижения работоспособности, временный упадок сил. Существуют признаки хронического утомления: ощущение утомления до начала работы, повышенная раздражительность, снижение интереса к работе и окружающим, снижение аппетита, потеря веса, нарушение сна, бессонница, предрасположенность к простудным заболеваниям. В целях борьбы с переутомлением необходима нормализация режима труда и отдыха желательно увеличение свободного времени за счет увеличения разнообразия работы за рабочий день.

7.3.3. Микроклимат

Под микроклиматом понимают качество воздушной среды в рабочей зоне. Большое значение для охраны здоровья и труда человека имеет качество воздуха в производственных помещениях, в частности в рабочих зонах. Рабочей зоной называется пространство, высотой до 2-х метров над уровнем пола или площадки, на которых находятся место постоянного или временного пребывания работающих (более 2-я часов непрерывно).

Эти требования устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия для рабочей зоны помещения, нормируемые следующими параметрами: температура, оптимальная влажность, скорость движения воздуха потока.

Значения перечисленных параметров непосредственно к проектируемому участку с категорией по тяжести IIб. приведены в таблице 7.3.

Таблица 7.3. – Метеорологические условия для рабочей зоны

Параметры	Сезоны года			
	Холодный		Тёплый	
	Оптим.	Допуст.	Оптим.	Допуст.
Температура, °C	17-19	15-22	19-21	16-27
Влажность, %	60-40	15-75	60-40	15-75
Скорость воздуха, м/с	0,2	0,2-0,4	0,2	0-0,5

Оптимальные и допустимые метеорологические условия для рабочей зоны регламентированы ГОСТ 12.1.1005-88.

Высокая интенсивность теплового облучения – инфракрасное излучение и высокая температура воздуха могут оказать крайне неблагоприятное на организм человека. Тепловое излучение интенсивностью до 350 Вт/м^2 не вызывает неприятного ощущения, при 1050 Вт/м^2 уже через 3 – 5 мин на поверхности кожи появляется неприятное жжение, температура кожи повышается на 8 – 10 градусов по Цельсию, а при 3500 Вт/м^2 через несколько секунд возможны ожоги. При облучении интенсивностью $700 - 1400 \text{ Вт/м}^2$ частота пульса увеличивается на 5 – 7 ударов в минуту. Время пребывания в зоне теплового облучения лимитируется в первую очередь температурой кожи, болевое ощущение появляется при температуре кожи 40 – 45 градусов по Цельсию, в зависимости от участка тела. Помимо непосредственного воздействия на человека лучистая теплота нагревает окружающие конструкции. Эти вторичные источники отдают теплоту окружающей среде излучением и конвекцией, в результате чего теплота воздуха внутри помещения повышается.

Тепловое облучение работающих не должно быть более 35 Вт/м^2 . Тепловое облучение лица и пруди работающих на постоянных и непостоянных местах

может достигать 140 Вт/м^2 при обязательном использовании средств индивидуальной защиты, в том числе защиты глаз.

7.3.4. Образование вредных веществ

На рассматриваемом участке при изготовлении и сборки статора происходит образование пыли и других вредных факторов.

Таблица 7.4. Допустимые концентраций вредных веществ.

Вещества	ПДК, мг/м	Класс опасности	Агрегатное состояние
СО	20	4	Газ
Пыль	6	4	Аэрозоль
Вредные пары	6	4	Аэрозоль

Периодический контроль содержания в воздухе рабочей зоны вредных веществ осуществляется силами заводской лаборатории или санитарно-гигиенической станции. С учётом предельно-допустимых концентраций вредных веществ, эти участки оснащаются вытяжной вентиляцией.

7.3.5. Освещение

Правильно спроектированное и выполненное освещение на предприятии обеспечивает возможность нормальной производственной деятельности. От освещения в значительной степени зависят: сохранность зрения работника, состояние его центральной нервной системы, безопасность на производстве, производительность труда и качество выпускаемой продукции.

В нормах [25] рекомендуемая освещённость производственных участков, содержащих необходимое оборудование для сборки двигателя, при системе общего освещения, должна быть не менее 200 лк.

При плохом освещении рабочий быстро устает, работает медленнее, возникает опасность ошибочных действий. Кроме того, плохое освещение может привести к некоторым профессиональным заболеваниям или ЧП.

Должны обеспечиваться следующие условия:

- равномерность и устойчивость освещенности;
- мягкие тени;
- защита глаз от прямых попаданий солнечных лучей.

В светлое время дня необходимый уровень освещенности обеспечивается естественным путем (через оконные проемы). В вечерние время применяется искусственное освещение (лампы накаливания, люминесцентные лампы и др.). Предпочтительнее использовать люминесцентные лампы, так как их освещение приближено к естественному.

Освещенность рабочей поверхности должна быть достаточно высокой и вместе с тем равномерной.

7.4. Пожарная безопасность

Участок сборки статора асинхронного двигателя, согласно [НПБ 105-03] относится к категории «Д», т.е. это производство, в котором обрабатываются негорючие вещества и материалы в холодном состоянии.

Источниками зажигания могут служить случайные искры различного происхождения (электрические, от обработки материала заточными и режущими станками и инструментом). Причиной возгорания может быть и повреждение электропроводки или электрооборудования в целом, курение в не установленном месте, замазученность оборудования и т.д.

Лица, не прошедшие противопожарный инструктаж к работе не допускаются. Каждый работающий на предприятии, независимо от занимаемой должности должен знать и строго соблюдать установленные правила пожарной безопасности, не допускать действий, могущих привести к пожару или загоранию.

Лица, виновные в нарушении настоящих правил, в зависимости от характера нарушений и их последствий, несут ответственность в установленном законом порядке – в дисциплинарном, административном или судебном.

Содержание зданий и помещений на объединении:

На входных дверях участка изготовление статора должны быть вывешены категории взрывопожароопасности (А, Б, В, Г, Д.); все производственные и вспомогательные помещения должны 1 раз в смену очищаться от промышленных отходов и горючих материалов; проходы, тамбуры, выхода, коридоры, лестничные клетки не разрешается загромождать; все выхода должны открываться по направлению из здания, помещения; ранение в цехах сырья, полуфабрикатов, горючих жидкостей разрешается только не более суточной, сменой потребности; использовать ГЖ (ГСМ жидкость) и ЛВЖ (легковоспламеняющаяся жидкость) для мойки деталей и узлов запрещается; для использованных обтирочных материалов на участке должны быть установлены металлические ящики с крышкой. По окончании смены они должны очищаться; сварочные работы, и другие огневые работы на участке изготовление и сборки статора должны производиться только по письменному разрешению и согласовываться с пожарной охраной, с пожарной охраной, с соблюдением всех указанных мероприятий; спец. Одежду следует хранить в специальных кабинках, изолированных от участка проведения механических и сборочных работ. В карманах не должны храниться промасленная ветошь. Спец. Одежда должна своевременно стираться.

На территории участка изготовления и сборки статоров запрещается:

- загромождать различными предметами и оборудованием, готовой продукцией и заготовками проходы, выхода, коридоры, лестничные проемы и подходы;
- хранить специальную одежду и другие сгораемые материалы на радиаторах, вешать на производственное оборудование, электроприборы;
- курить, пользоваться открытым огнем, не предусмотренным спец. Технологией, разводить костры;
- производить уборку помещений, оборудования с применением ЛВЖ и ГЖ;

- скапливать на рабочем месте мусор, промасленную ветошь;
- использовать не по назначению противопожарный инвентарь;
- загромождать различными предметами проходы, выходы;
- самовольно подключать в электросеть электронагревательные приборы;
- пользоваться неисправными, кустарного производства электроприборами;
- оставлять включенными станки, электроприборы без просмотра;
- при работе с огнеопасными жидкостями использовать инструмент могущий вызвать искрообразование;
- соприкосновение промасленной одежды, масел и др. жиров с арматурой кислородных баллонов;
- использоваться не просушенными коврами, инструментами при разливе металла пользоваться заливщикам неисправной и необработанной огнезащитным составом спец. одеждой;
- хранить без упаковки и рассыпать уретропин.

Каждый работающий на объединении должен знать:

- при обнаружении пожара или загорания вызвать пожарную помощь и принять меры к ликвидации очага пожара или действовать по указанию старшего начальника или ДПД;
- знать пути эвакуации из помещения (образец представлен на рисунке);
- знать пожароопасность своего цеха, участка и при обнаружении нарушений противопожарного характера устранить их или сообщить начальнику цеха;
- знать и уметь пользоваться первичными средствами пожаротушения;

На участке изготовление и сборки статора используются средства пожаротушения, такие как:

- Огнетушитель ОУ-3 – Углекислотный, предназначенный для тушения загорания установок под напряжением до 1000 В. При загорании снять огнетушитель, поднести к загоранию, выдернуть чеку и нажать на рычаг, а затем направить раструб на огонь.
- Стационарная пенная установка – предназначена для тушения загорания различных веществ, за исключением щелочных и щелочноземельных веществ.

При загорании размотать рукав, открыть вентили вода, воздух и направить пожарный рукав на огонь.

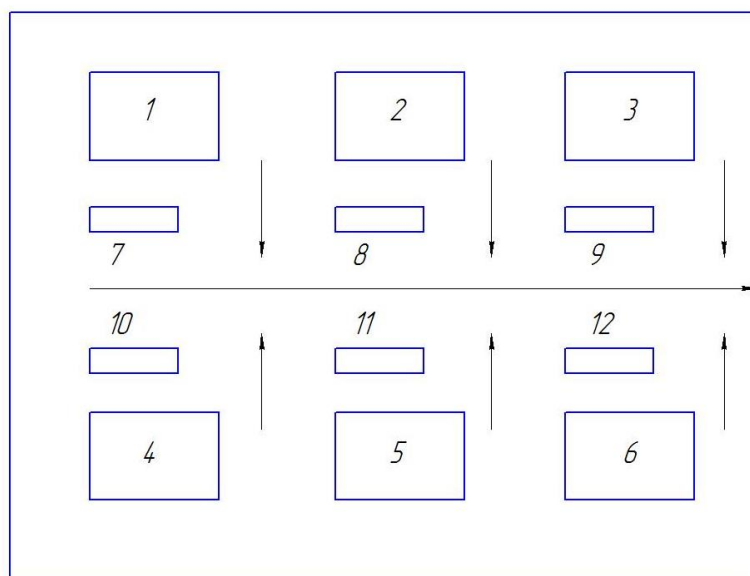


Рисунок 7.1. План эвакуации

1, 2, 3, 4, 5, 6, -станки; 7,8, 9, 10, 11,12 –места складывания

7.5. Охрана окружающей среды

Защита окружающей среды – это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий, является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это требует решения целого комплекса сложных технологических и конструктивных задач, основанных на исследовании новейших научно-технических достижений.

Важными направлениями следует считать совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов в окружающую среду, замену и по возможности широкие применение дополнительных методов и средств защиты окружающей среды.

В качестве дополнительных средств защиты применяют аппараты и системы для очистки газовых выбросов, сточных вод от примесей, глушителей шума,

виброизоляторы технологического оборудования. Важную роль в защите окружающей среды отводится мероприятия по рациональному размещению источников загрязнения: оптимальное расположение промышленных предприятий с учетом местности; установление санитарно-защитных норм вокруг промышленных предприятий.

Вследствие использования работниками душевых и туалетов образуются жидкие отходы для удаления, которых применяют канализационную систему.

Также из-за использования обтирочных материалов образуются твердые отходы, для которых предусмотрены места хранения, и в конце смены они очищаются. При удалении отходов с территории предприятия им присваиваются категории опасности и вывозятся на соответствующие полигоны (промышленных отходов, токсичных отходов и т.д.).

Неуклонный рост поступлений токсичных веществ в окружающую среду, прежде всего, отражается на здоровье населения, ухудшает качество продукции сельского хозяйства, снижает урожайность, преждевременно ухудшает жилища, металлоконструкции промышленных и гражданских сооружений, оказывает влияние на климат отдельных регионов и состояния озонового слоя Земли, приводит к гибели флоры и фауны.

С целью охраны окружающей среды от загрязнений предусматривается внедрение:

- системы оборотного водоснабжения;
- системы очистки дождевой канализации;
- пыле и газоулавливания.

7.6. Расчет искусственного освещения

Правильно спроектированное и выполненное освещение на предприятиях машиностроительной промышленности, обеспечивает возможность нормальной производственной деятельности.

Задача расчета искусственного освещения является определение числа светильников, их типа, мощности источников света.

7.6.1. Выбор источников света

К числу источников света массового применения относятся лампы накаливания, лампы ДРЛ, люминесцентные лампы.

Лампы накаливания применяются там, где проводятся грубые работы, или осуществляется общий надзор за эксплуатацией оборудования. Кроме того, предпочтение лампам накаливания отдается во взрыва – и пожароопасных помещениях, в сырых помещениях, в сырых помещениях, в помещениях с химически активной средой.

Основным источником света, как для общего, так и для комбинированного освещения, являются люминесцентные лампы: АД4, ЛД, ЛХБ, ЛД, ЛТБ. Из них наиболее экономичными являются лампы типа ЛБ.

7.6.2. Выбор системы освещения

Применение на рабочих местах одного освещения не допускается. Общее же равномерное освещение применяется для тех помещений, где работа производится по всей площади, и нет необходимости в лучшем освещении отдельных участков.

Система общего локализованного освещения применяются тогда, когда в производственном помещении есть участки, на которых проводятся работы с высоким зрительным напряжением.

Система комбинированного освещения применяется в помещении, где выполняются точные зрительные работы; в случае необходимости определённого, изменяемого в процессе работы направления света, а также в помещениях с не высокой плотностью распределения рабочих мест.

7.6.3. Выбор коэффициента запаса

Полученная из [СНиП 42.01-2100] величина освещенности корректируется с учётом коэффициента запаса, так как со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп освещённость снижается.

Таблица 7.5. Значение коэффициента запаса

Характеристика объекта	Люминесцентные лампы	Лампы накаливания
Помещения с большим выделением пыли	2,0	1,7
Помещения со средним выделением пыли	1,8	1,5
Помещения с малым выделением пыли	1,5	1,3

7.6.4. Выбор светильника

Выбираем светильники ПВЛ, т.к. он является пыле-влагозащищёнными и больше всего подходит для эксплуатации в запыленной среде. Мощность лампы 2x40 Вт.

7.6.5. Размещение осветительных приборов

При выборе расположения светильников необходимо руководствоваться двумя критериями:

- Обеспечение высокого качества освещения, ограничение ослеплённости и необходимой направленности света на рабочие места;
- Наиболее экономичное создание нормированной освещенности.

Как показали исследования, в зависимости от типа светильников существует наивыгоднейшее расстояние между светильниками:

$$\lambda = L/h$$

где L – расстояние между светильниками.

h – высота подвеса светильника над рабочей поверхностью.

Расстояние от стен помещения до крайних светильников рекомендуется брать L/3.

Выбираем люминесцентный светильник с защищённой решёткой:

Тип ОДО, $\lambda=1,2$ размеры помещения A=15 м, B=10 м

$$h = 4 - 0,5 - 0,8 = 2,7 \text{ м}$$

$$L = 1,2 \cdot 2,7 = 3,24 \text{ м}$$

$$L/3 = 1 \text{ м}$$

Размещаем светильники в три ряда. В каждом ряду можно установить 7 светильников типа ПВЛ мощностью 2*40 Вт (Д*Ш*В=1230*226*155), при этом разрывы между светильниками в ряду составят 50 см. изображаем в масштабе план помещения и размещения на нем светильников. Учитывая, что в каждом светильнике установлено две лампы, общее число ламп в помещении

$$n = 42$$

7.6.6. Расчет осветительной установки

Расчет производится методом коэффициента использования. Применяя этот метод можно определить световой поток лампы, необходимый для создания заданной освещенности горизонтальной поверхности с учетом света, отражённого стёклами, стендами и потоками. Метод коэффициента использования применяется только при расчете общего равномерного освещения.

Величина светового потока лампы:

$$F = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot Z}{N \cdot \eta} = \frac{250 \cdot 1.5 \cdot 150 \cdot 1.1}{42 \cdot 0.6} = 2455.3 \text{ лк.}$$

где E – минимальная освещённость, лк

k – коэффициент запаса

S – площадь помещения

λ – коэффициент использования светового потока

Z – коэффициент неравномерности освещения

Коэффициент использования светового потока η – отношение полного светового потока, достигающего освещаемой поверхности, к полному световому потоку в помещении.

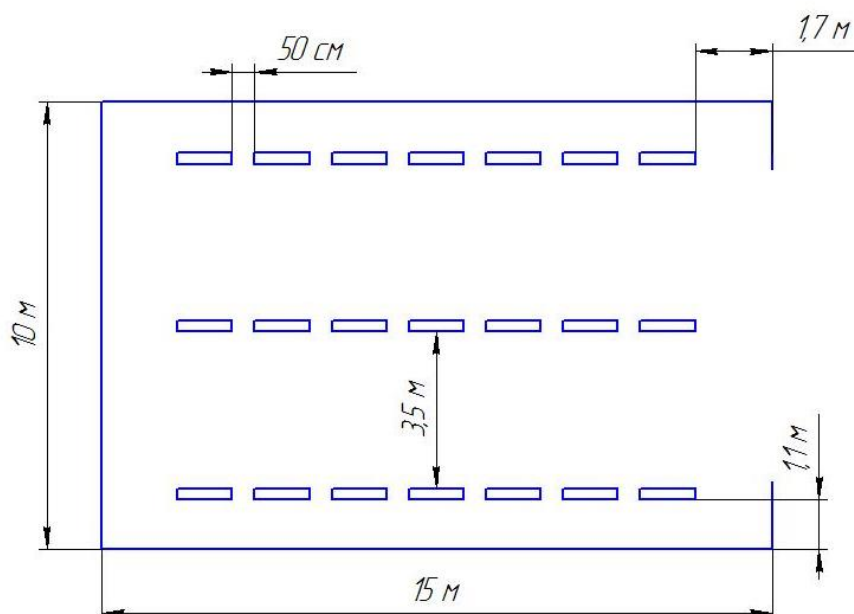


Рисунок 7.2. План помещения и размещения светильников с люминесцентными лампами

Рассчитаем индекс помещения:

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{150}{2.7 \cdot (15 + 10)} = 2.2$$

Коэффициент использования светового потока составляет: $\eta = 0,6$

Коэффициенты отражения:

$\rho_{\text{п.}} = 70\%$ - состояние потока

$\rho_0 = 70\%$ - состояние стен

Коэффициент неравномерности Z введен в формулу светового потока, потому что освещенность, подчитанная без этого коэффициента, является не минимальной, как требуют нормы, а средней. Введением коэффициента Z это несоответствие устраняется. Для люминесцентных ламп $Z = 0,9$; $E = 250$ лк – минимальная

нормативная освещённость, принимается по СНиП 42-01.2100. Выбор ламп по освещённости – наиболее подходящий, по люксам: $250 > 200$.

Выбираем ближайшую стандартную лампу – ЛТБ 40 Вт с потоком 2450 Лм. Делаем проверку выполнения условия.

$$-10\% \leq \frac{\Phi_{\text{л.станд}} - \Phi_{\text{л.расч}}}{\Phi_{\text{л.станд}}} \cdot 100\% \leq +20\%$$

Получаем $-10\% \leq -0,2\% \leq +20\%$

Определяем электрическую мощность осветительной установки

$$P = 42 \cdot 40 = 1680 \text{ Вт}$$

В ходе расчета были рассчитаны 21 светильных установок, в каждом светильнике установлены 2 лампы, общее число ламп 42. Световой поток каждой лампы составляет 2455.6 лк. Общая электрическая мощность осветительных установок составляет 1680 Вт.

7.7. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация – это обстановка на территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы. К ним относятся взрывы, пожары, отключение электроэнергии, наводнение, землетрясение и т.д. Поэтому на производственном объекте надо предусмотреть максимально эффективную безопасность от такой угрозы и даже резервные источники жизнедеятельности для некоторых случаев наступившей катастрофы. К таким источникам относятся дизельный генератор для вырабатывания электроэнергии, резервная скважина питьевой воды и т.д.

Самыми возможными ЧС в механосборочном цехе могут быть пожары и взрывы с тяжёлыми социальными и экономическими последствиями, зачастую приводящие к гибели людей. Наиболее часто встречающееся – это пожар. В таких случаях одним из основных способов защиты является своевременный и быстрый вывод людей из опасной зоны, т.е. эвакуация. В числе мероприятий по защите персонала

предприятия, которые разрабатываются объектовой комиссией, указываются действия по эвакуации работающей смены, как при угрозе, так и при возникновении ЧС. Исходя из прогнозируемости возникновения аварий, катастрофы или стихийного бедствия которые могут повлечь за собой человеческие жертвы, принести ущерб здоровью людей, нарушить условия их жизнедеятельности, намечаются следующие мероприятия и временные параметры по эвакуации:

- определяется вид эвакуации (плановая или экстренная);
- производится расчёт рабочих и служащих, необходимых для проведения эвакуации;
- устанавливаются мероприятия по безаварийной остановке производства;
- намечаются схемы движения эвакуируемых из зоны ЧС к пунктам временного размещения и др.

Вопросы эвакуации для изучения включаются в тематику занятий с рабочими и служащими в системе ГО.

Организация эвакуации различна для персонала предприятия.

С учётом анализа и оценки ситуации руководитель объектовой комиссии по ЧС может принять одно из решений:

- провести эвакуацию внутри объекта;
- вывести персонал за пределы объекта;
- применить комбинированный метод.

Чрезвычайные ситуации могут иметь и не разрушительных характер, но иметь при этом тяжёлые последствия. Рассмотрим ЧС природного явления биолого-социального характера, а именно групповые случаи опасных инфекционных заболеваний. Список этих заболеваний, которые вошли в перечень событий, что могут взять собой чрезвычайную ситуацию в системе охраны здоровья сейчас значительно большой.

Согласно приложению №2 ММСП-2005 он разделен на две группы . первая группа – «болезни, которые являются необычными и могут оказать серьезное влияние на здоровье населения»: оспа, полиомиелит, вызванный диким

полиовирусом, человеческий грипп, вызванный новым подтипом, тяжелый острый респираторный синдром (ТОРС) или (SARS).

Вторая группа – это «болезни, любое событие с которыми всегда оценивается как опасное, поскольку эти инфекции обнаружили способность оказывать серьезное влияние на здоровье и быстро распространяться в международных масштабах»: холера, легочная форма чумы, желтая лихорадка, геморрагические лихорадки – лихорадка Ласса, Марбург, Эбола, лихорадка Западного Нила.

По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно на земном шаре переносят инфекционные заболевания свыше 1 млрд. человек. Инфекция идет от больного человека к здоровому воздушно-капельным механизмом передачи. Если вовремя не принять адекватные противоэпидемические меры, то в течение короткого срока может заразиться большое количество работников. Вот почему очень важно знать признаки особо опасных инфекций, эпидемий и особенности работы спасателя в очагах особо опасных инфекций.

Поэтому важно учесть характер рабочего места, санитарное состояние помещения, характер питания и метод осуществления медицинского надзора за столовой на предприятии, содержание туалетов, соблюдением правил личной гигиены, обследование и состояние источников водоснабжения, водозабора, объектов общественного питания, периодичность и состояние очистки территории. Проводить ежегодные мероприятия профилактического медицинского осмотра, включающие рентгеноскопию, анализ крови и т.д. Ещё за благовременно до эпидемии проводить инъекцию работников (например прививка от гриппа).

При выявлении больного с ООИ в лечебно- профилактическом учреждении (ЛПУ) приём пациентов в кабинете (осмотр в палате) прекращается. Запрещается выход из кабинета всех лиц, находящихся в нём. Врач через телефон или проходящий в коридоре медперсонал передаёт начальнику ЛПУ (главврачу, заведующему) о выявлении случая ООИ, используя специальные коды (не называя само заболевание).

Начальник ЛПУ сообщает по коду выявленное заболевание начальнику департамента здравоохранения региона и главному санитарному врачу регион. Главный санитарный врач обеспечивает подготовку специального стационара на базе инфекционной больницы (инфекционного отделения), а также вызывает машинную перевозку к месту выявления ООИ.

Запрещается выход из ЛПУ всех лиц, находящихся в нём. Старшая медсестра ЛПУ выставляет к кабинету ответственного медработника, отвечающего за передачу необходимых материалов в кабинет. В кабинет передаются комплекты спецодежды (противочумные костюмы) для медработников, дезсредства, экстренная укладка для взятия анализов на ООИ, медикаменты и оборудование, необходимые для оказания первой медицинской помощи больному. Старшая медсестра обеспечивает перепись всех лиц, находящихся в ЛПУ.

Медработники в кабинете после предварительной обработки себя дезсредствами надевают спецодежду, берут анализы на инфекцию в установленной форме, оказывают больному первую медицинскую помощь. Врач заполняет экстренное извещение в СЭС. По прибытию машинной перевозки медработника и другие находящиеся в кабинете вместе с больным отправляются в медицинский стационар. Больной помещается в палату-бокс, сопровождающие – в изолятор на карантин. Находящиеся в ЛПУ люди выпускаются, дезстанция СЭС проводит во всех помещениях заключительную дезинфекцию.

Составляется список людей, контактировавших с заболевшим. Близкоконтактные (члены семьи и жильцы одной квартиры, друзья, близкие соседи и члены коллектива, медработники, обслуживание пациента) помещаются в изолятор на карантин. Неблизкоконтактные (неблизкие соседи и члены коллектива, медработники и пациенты ЛПУ, в котором была выявлена ООИ) берутся не учёт участково-терапевтической службой. При выявлении у неблизкоконтактных подозрительных симптомов, они госпитализируются в диспансерное отделение инфекционного стационара. По распоряжению главного эпидемиолога среди неблизкоконтактных может быть проведена экстренная вакцинация. Неблизкоконтактные, не имеющие симптомов и желающие выехать из очага

предварительно помещаются в наблюдательное отделение инфекционного стационара на карантин. При значительном количестве заболевших в населённом пункте может быть объявлен карантин.

Такие экстренные меры необходимые для сохранения здоровья и безопасности нации.

В разделе производственная и экологическая безопасность был проведён анализ опасных и вредных факторов, техника безопасности рабочего и пожарной безопасности, производственная санитарная, рассмотрены разделы микроклимата, и охрана окружающей среды, произведен расчет освещения цеха, в котором изготавливается статор асинхронного двигателя и меры чрезвычайной ситуации при обнаружении особо опасной инфекции.

Заключение

В процессе выполнения данной выпускной квалификационной работы в соответствии с заданием спроектирован асинхронный двигатель с фазным ротором мощностью $P_{2H}=22$ кВт, числом полюсов $2p=8$, напряжением $U_H=220/380$ В, высотой оси вращения $h=225$ мм.

Главные размеры двигателя, выбранные в электромагнитной расчете, составили: наружный диаметр магнитопровода статора $D_a=0,4$ м; внутренний диаметр магнитопровода статора $D=0,292$ м; длина воздушного зазора $l_\delta=0,148$ м; длина сердечника статора $l=0,148$ м.

Число пазов статора и ротора $Z_1=72$, $Z_2=48$. Обмотки статора и ротора выбраны однослойными петлевыми. Номинальные токи обмоток статора и ротора составили $I_{1ном}=46,72$, $I_{2ном}=43,79$ А.

Рассчитанные пусковые и рабочие данные двигателя при номинальной нагрузке составили: КПД $\eta_{ном} = 0.8545$; коэффициент мощности $\cos\varphi_{ном} = 0.8238$, пусковой ток $I_{п} = 3.739$ о.е.; пусковой момент $M_{п}=0.099$ о.е. Полученные значения удовлетворяют требованиям, предъявляемые к двигателю.

В результате проведенного теплового расчета найдено, что превышения температуры статора и ротора над температурой окружающей среды составляют $\theta_{m1} = 52.543$ °С для статора и $\theta_{m2} = 54.239$ °С для ротора. Данный расчет показал, что полученные температуры входят в допустимые пределы для выбранного класса изоляции F.

Механический расчет вала показал, что жесткость и критическая частота вращения вала удовлетворяют требуемым условиям. В результате был выбран шарикоподшипник радиальный однородный, условное обозначение 314, $d=70$ мм, $D=150$ мм, $B=35$ мм, $r=3.5$ мм, динамическая грузоподъемность $C_0=63200$ Н, $n=4000$ об/мин. ГОСТ 8338-75.

В специальной части проекта определено, что плавный пуск двигателя может быть обеспечен пяти ступенчатым реостатом.

Пусковые свойства двигателя обеспечивает пяти ступенчатый регулировочный реостат. Рассчитаны сопротивления каждой ступени, построена пусковая диаграмма. По результатам расчета выбран комплект – блок резисторов Б6МУ2 и составлена монтажная схема соединений ящиков резисторов.

Разработанный технологический процесс сборки статора обеспечивает выпуск продукции в размере 5000 шт./год. Для выпуска продукции сделан выбор оборудования, который состоит из следующих станков:

- токарно – винтовым станком 16K20
- продольно – фрезерный станком 6305
- прессом гидравлическим П7320

Составлен график загрузки оборудования, на котором видно, что наиболее загруженным оборудованием является продольно – фрезерный станок 6305. Определены нормы времени технологического процесса. Также была составлена маршрутная карта, в которой поэтапно отражены все операции по сборке статора.

В ходе расчета была проведена калькуляция себестоимости продукции. Установлена конкурентоспособная цена и рентабельность продукции. Также был построен график безубыточности, определяющий критический объем производства, определена критическая программа выпуска для предприятия, приведен SWOT-анализ продукции.

Ресурсоэффективность данного проекта заключается в том, что при проведении организационно-технических мероприятий удалось сократить норму расхода материалов, расходы на силовую электроэнергию, расходы на оплату заработной платы. Себестоимость спроектированного двигателя составило 26,5 тыс.руб. на 9,86 % меньше по сравнению с базовым вариантом. Установлено цена на продукция в размере 35 тыс.руб. (без учета НДС). Рентабельность выпускаемого двигателя составило 32%. Снижение норм расходов на основные материалы, расходы на силовую электроэнергию и оплату труда позволило увеличить рентабельность выпускаемого двигателя на 68 % по сравнению с базовым вариантом. Такие показатели являются главными критериями успешности разработанного проекта.

Проведен анализ опасных и вредных факторов при производстве. Рассмотрены правила техники и пожарной безопасности. Проведен расчет искусственного освещения. В ходе расчета были рассчитаны 21 светильная установка, в каждом светильнике установлены 2 лампы, общее число ламп 42. Световой поток каждой лампы составляет 2455,6 лк. Общая электрическая мощность осветительных установок составляет 1680 Вт, что удовлетворяет требованиям.

В целом, спроектированный асинхронный двигатель с фазным ротором удовлетворяет требованиям, определенным заданием.

Список использованных источников

1. Проектирование электрических машин: Учеб.пособие для вузов/И. П. Копылов, Ф. А. Горяинов, Б. К. Клоков и др.; Под ред. И. П. Копылова. М.: Энергия, 1980. – 496 с.
2. Техническая документация АО «Алмалыкский ГМК» Медеплавильный завод. №10950. 2012 г.
3. Рязяев С., Алмалыкский горно-металлургический комбинат. Ташкент, гл. ред. ИПК "Шарк"– 2006 г. – 140 с.
4. Гурин Я.С., Кузницов Б.И. проектирование серий электрических машин. - М.: Энергия, 1978. - 480 с, ил.
5. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т1 / Под общ. Ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. - М.: Электроатомиздат, 1989. - 688 с, ил.
6. Справочник по электрическим машинам: В 2 т. Т2/ Под общ. Ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. - М.: Электроатомиздат, 1989. - 688 с, ил.
7. Справочник по электрическим машинам: Учеб. Пособие для студ. образоват. учреждений сред. проф. образования / М.М. Кацман. – М.: Изд. центр «Академия», 2005. – 480 с.
8. Антонов М.В. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 592 с.
9. Сборка и монтаж изделий машиностроения: справочник в 2-х т. Т. 1 / под ред. В.С. Корсакова, В.К. Замятина. – М.: Машиностроение, 1983. – 480 с.
10. Горбацевич А.Ф. Курсовое проектирование по технологии машиностроения / А.Ф. Горбацевич, В.А. Шкред. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 256 с.
11. Сборка и монтаж изделий машиностроения: справочник в 2-х т. Т. 2 / под ред. В.С. Корсакова, В.К. Замятина. – М.: Машиностроение, 1983. – 360 с.
12. Экономический словарь. <http://www.ekoslovar.ru/350.html>

13. Интернет ресурс. <http://fd.ru/articles/5625-analiz-riskov-investitsionnogo-proekta>
14. Интернет ресурс. <http://www.grandars.ru/college/ekonomika-firmy/ocenka-konkurentosposobnosti-predpriyatiya.html>
15. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие /Криницына З.В., Видяев И.Г.; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.
16. Криницына З.В. Ресурсоэффективность отрасли: Учебное пособие /З.В.Криницына. – Томск, издательство Томского политехнического университета, 2013. – 182 с.
17. Волкова Л. Методика проведения SWOT-анализа // http://market.narod.ru/S_StrAn/SWOT.html.
18. Интернет ресурс. <http://cck.ru/catalog/electricals/>
19. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность технологических процессов и производств (охрана труда): Учеб. пос. для вузов // П.П. Кукин, В.Л. Лапшин, Е.А. Подгорных и др. – М.:Высш. шк. 1999.-318 с.
20. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
21. Правила устройств электроустановок. 6-е изд. с изм. и дополн. – СПб, 1999.-123 с.
22. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ защитное заземление, зануление.
23. ГОСТ 12.1.003.-83 (1999) ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
24. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки. М.: Минздрав России, 1997.
25. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и современному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.
26. Федосова В.Д. Расчет искусственного освещения. Метод. Указания. – Томск: Изд-во ТПУ, 1991. – 23 с.

27. ГОСТ 12.0.003-74.ССБТ. Обучение работающих безопасности труда.
28. ГОСТ 12.1.004.-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования (01.07.92).
29. ГОСТ 12.1.005.-88 (с изм. №1 от 2000 г.). ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (01.01.89).
30. ГОСТ 12.1.012-90 ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования.
31. СН 2.2.4/2.1.8.556.-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданиях. – М.: Минздрав России, 1997.
32. НПБ 105-03 «Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности» (утв. Приказом МЧС РФ от 18 июня 2003 г. №314).
33. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278-03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий. – М.: Госкомсанэпиднадзор, 2003.

