

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

Институт Институт электронного обучения
Специальность 140601.65 «Электромеханика»
Кафедра «Электротехнические комплексы и материалы»

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ/РАБОТА

Тема работы	
Проектирование асинхронного двигателя малой мощности для систем автоматики УДК 621.313.333.681.51.001	

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3 - 7301	Харчева Светлана Викторовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Падалко Дмитрий Андреевич			

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Технология производства»

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

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., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. Кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭКМ	Гарганеев Александр Георгиевич	д.т.н., профессор		

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

Институт _____ Энергетический институт
Направление подготовки (специальность) _____ «Электромеханика»
Кафедра _____ «Электротехнических комплексов и материалов»

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой
_____ Гарганеев А.Г.
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы
В форме:

Дипломного проекта

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студент:

Группа	ФИО
3-7301	Харчева Светлана Викторовна

Тема работы:

Проектирование асинхронного двигателя малой мощности для систем автоматики	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	25.03.2016 №2368/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	30.05.2016
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе (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.).	Асинхронный двигатель: Номинальная мощность $P_{2н} = 90$ Вт; Число фаз статора $m = 3$; Номинальное напряжение $U_n = 220/380$ В; Число полюсов $2p=2$; Частота сети равна $= 50$Гц; Степень защиты IP44; Способ монтажа IP1081; Система охлаждения IC0141.
--	---

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 исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования).</i>	Целью данного дипломного проекта является изучение метода проектирования маломощных асинхронных и оценивание динамических характеристик спроектированного двигателя при работе на нагрузку типа промышленного вентиля.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Сборочный чертеж двигателя. 2. Обмотка статора. 3. Паз статора. 4. Паз ротора. 5. Чертеж ротора.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Электромагнитный расчет. Специальная часть.	Падалко Д.А.
Технологическая часть	Баранов П.Р.
Социальная ответственность	Сечин А.А.
Экономическая часть	Кузьмина Н.Г.
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: 1. Литературный обзор. 2. Электромагнитный расчет. 3. Тепловой и вентиляционный расчет. 4. Механический расчет. 5. Расчет динамических параметров. 6. Технологическая часть. 7. Специальная часть. 8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение. 9. Социальная ответственность. 10. Заключение.	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	23.12.2015
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень	Подпись	Дата
Ассистент	Падалко Дмитрий Андреевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-7301	Харчева Светлана Викторовна		

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

Студенту:

Группа	ФИО
3 - 7301	Харчевой С.В.

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

Исходные данные к разделу «Технологический процесс общей сборки асинхронного двигателя малой мощности короткозамкнутым ротором»:

1. Сборочный чертеж асинхронного двигателя малой мощности с короткозамкнутым ротором, 90 Вт, спецификация;
2. Годовая программа выпуска изделия 5000 штук

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

- | | |
|--|--|
| 1. Анализ конструкции электрической машины на технологичность | 2. Рассчитать размерные цепи методом полной взаимозаменяемости (проектный метод, два замыкающих звена) |
| 3. Составить схему сборки электрической машины | 4. Выбрать оборудование, приспособления для сборки и испытаниям электрической машины |
| 5. Разработать маршрутную технологию сборки электрической машины | 6. Определить нормы времени на операции и оборудование |
| 7. 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 электрической машины

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 - 7301	Харчева С.В.		

«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студент:

Группа	ФИО
3 - 7301	Харчева Светлана Викторовна

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

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

3. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, норма, анкетирование; опрос
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

8. Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)	Формирование плана разработки проекта
9. Обоснование необходимых инвестиций для разработки и внедрения ИР	Смета затрат на проект
10. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Определение технического уровня

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 - 7301	Харчева Светлана Викторовна		

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студент:

Группа	ФИО
3 - 7301	Харчева Светлана Викторовна

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

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

- Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:
 - вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации)
 - 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:

- 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;
- Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:
 - механические опасности (источники);
 - электробезопасность ;
 - пожаровзрывобезопасность (профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)
- Охрана окружающей среды:
 - анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);
 - анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);
- Защита в чрезвычайных ситуациях:
 - 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., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3 - 7301	Харчева Светлана Викторовна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 128 страниц, 14 рисунков, 12 таблиц, 16 источников, 5 приложений.

Ключевые слова: мощность, асинхронный двигатель, короткозамкнутый ротор, статор, нагрузка, изоляция, характеристика, динамические параметры, технологичность, конструкция, оборудование, технические условия.

Объектом исследования и проектирования является асинхронный двигатель малой мощности с короткозамкнутым ротором, предназначенный для работы в системах автоматики.

Целью дипломного проектирования является изучение метода проектирования маломощных асинхронных машин и оценивание динамических характеристик спроектированного двигателя при работе на нагрузку типа промышленного вентиля.

В процессе исследования проводился сбор необходимой информации по теме проектирования: анализ литературы и технической документации, изучение и область применения разрабатываемого двигателя на примерах существующих прототипов. Была выбрана наиболее подходящая методика проектирования и проведены необходимые расчеты: электромагнитный, тепловой и вентиляционный, механический, динамических параметров. Разработан технологический процесс общей сборки двигателя, изучена социальная ответственность в области безопасности жизнедеятельности, определена смета затрат на проект и технический уровень новшества.

В результате был спроектирован трехфазный асинхронный двигатель малой мощности с короткозамкнутым ротором и проведена оценка его рабочих и динамических параметров на соответствие требуемым техническим и эксплуатационным характеристикам системы автоматики.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2003 и представлена на бумаге формата А4. Графический материал выполнен в редакторе компас – 3D V12 Plus на бумаге формата А3.

ОГЛАВЛЕНИЕ

	С.
Введение.....	10
1. Литературный обзор.....	13
2. Электромагнитный расчет.....	20
2.1 Выбор главных размеров.....	20
2.2 Расчет размеров зубцовой зоны и обмотки статора.....	22
2.3 Расчет ротора.....	28
2.4 Расчет магнитной цепи.....	33
2.5 Параметры рабочего режима.....	36
2.6 Расчет потерь.....	41
2.7 Расчет рабочих характеристик.....	43
2.8 Расчет пусковых характеристик.....	48
3. Тепловой и вентиляционный расчет.....	53
3.1 Тепловой расчет.....	23
3.2 Расчет вентиляции.....	26
4. Механический расчет.....	57
4.1 Расчет вала на жесткость.....	57
4.2 Расчет вала на прочность.....	60
4.3 Выбор подшипников.....	62
5. Расчет динамических параметров.....	64
6. Технологическая часть.....	65
6.1 Введение.....	65
6.2 Оценка технологичности конструкции.....	66
6.3 Размерный анализ конструкции электродвигателя методом полной взаимозаменяемости.....	69
6.4 Составление схемы сборки и маршрутной технологии общей сборки электрической машины.....	73
6.5 Выбор сборочного оборудования и оснастки.....	75

6.6	Нормирование сборочных работ и расчет количества технологического оборудования.....	76
6.7	Заключение.....	81
7.	Специальная часть.....	82
8.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	88
8.1	Введение.....	88
8.2	Определение себестоимости проекта.....	88
8.3	Оценка технического уровня.....	93
9.	Социальная ответственность.....	97
9.1	Введение.....	97
9.2	Техногенная безопасность.....	98
9.3	Региональная безопасность.....	115
9.4	Особенности законодательного регулирования проектных решений.....	117
9.5	Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	119
10.	Заключение.....	120
	Список источников.....	122
Приложение А	Схема обмотки статора	124
Приложение Б	Паз статора	125
Приложение В	Паз ротора	126
Приложение Г	Схема сборки асинхронного двигателя	127
Приложение Д	Комплект документов на технологический процесс сборки асинхронного двигателя (маршрутная карта)	-
Приложение Е	Программа в MatLab, листинг	128
Графический материал		
ФЮРА. 521600.015	Спецификация	
ФЮРА. 521600.015.СБ	Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором 90 Вт. Сборочный чертеж	
ФЮРА. 684261.016.СБ	Ротор в сборе. Сборочный чертеж	

Введение

Современные условия развития промышленности, транспорта, сельского хозяйства, новых отраслей техники, специальных видов техники привело к разработке и внедрению автоматического управления рабочими процессами и механизмами. Автоматическое управление не возможно без применения маломощных электродвигателей мощностью в диапазоне от нескольких единиц до сотен ватт в качестве исполнительных и управляющих элементов. Электрические машины малой мощности (ЭМММ) широко используют не только в системах автоматики, но и для других целей.

Производство электрических машин малой мощности является отраслью электротехники, характеризующейся высокими темпами роста, разнообразием применения и большим числом исполнений ЭМММ. Высокие темпы роста производства этих машин обусловлены возрастающим спросом со стороны отраслей промышленности, сельского хозяйства, транспорта, а также бытовой техники.

В нашей стране проводится большая работа по исследованию, проектированию и производству различных типов электрических двигателей малой мощности с участием многих научно – исследовательских институтов, проектных организаций, заводов. Накоплен значительный опыт эксплуатации двигателей малой мощности.

Дальнейший рост производства малых электрических машин требует качественно нового подхода к организации производства малых машин, их проектирования и исследования.

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

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

2) Достижение максимальных параметров качества и надежности.

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

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

Проектирование асинхронных двигателей малой мощности обусловлено рядом специфических особенностей, отличающих их от более исследованных и изученных двигателей средних и больших мощностей. Закономерности изменения геометрических соотношений и электромагнитных величин в сериях асинхронных двигателей приводят для двигателей малых мощностей (до 1 кВт) к существенным количественным и качественным изменениям условий проектирования. Основными факторами, на которых отражаются «особенности» малых машин, являются следующие: массогабаритные и технологические показатели, конструкция узлов и деталей, применяемые материалы, тепловые нагрузки. Каждый из перечисленных факторов нуждается в детальном рассмотрении.

ЭМММ, используемые в автоматических устройствах должны удовлетворять разнообразным требованиям. Тем не менее, их можно разделить на две основные группы: общие и специфические.

Общие требования не отличаются от требований, предъявляемых к обычным электрическим машинам. Они являются общими для всех ЭМММ независимо от функций, которые они выполняют в схемах автоматики. Перечень этих требований содержится в ГОСТ 183–74 и включает в себя такие величины, как номинальные значения напряжения, частоты, потребляемых тока и мощности, КПД, номинальной полезной мощности, $\cos\phi$, допустимого значения превышения температуры, уровня шума, сопротивления изоляции.

Специфические требования касаются только определенного типа машин и определяются теми функциями, которые машины данного типа выполняют в схемах автоматики.

Проектируемая машина предназначена для работы в качестве исполнительного механизма в составе электропривода промышленного вентиля. Специфические требования, предъявляемые к исполнительным двигателям: должны иметь требуемые статические характеристики и надлежащее быстродействие, малые значения мощности управления и напряжения трогания.

Для проектируемого двигателя приняты: номинальное фазное напряжение $U_{ном} = 220/380 \text{ В}$, число полюсов $2p = 2$ при номинальной частоте питающей сети $f_1 = 50 \text{ Гц}$. Проектирование любой новой электрической машины начинают с выбора базовой модели, на которую ориентируются при проведении всех расчетов, начиная с выбора главных размеров и при разработке основных узлов. В данном проекте выбран двигатель ДАТ 53271 (4АА50А2У3), являющийся прототипом для проектируемого нами двигателя, имеющий такую же высоту оси вращения и число полюсов и по мощности, которая равна 90 Вт.

В выпускной работе при проектировании двигателя первоочередной задачей является, на основе анализа методов расчетов, найти наиболее подходящее проектное решение и спроектировать двигатель с более высокими энергетическими показателями: КПД, коэффициентом мощности по сравнению с аналогом и провести исследование возможностей проектируемого двигателя в качестве исполнительного механизма при работе на нагрузку промышленного вентиля в соответствии с заданными параметрами системы.

1. Литературный обзор

В ходе выполнения данной работы для принятия наиболее подходящего проектного решения по теме «Проектирование асинхронного двигателя малой мощности для систем автоматики» с исходными данными, обусловленными техническим заданием, проводился подбор необходимых источников информации. Основной базой в изучении, исследовании и проведения расчетов по заданной теме являлась техническая, учебно-методическая, справочная литература, нормативные документы и стандарты.

Электрические машины мощностью до 1 кВт вследствие своей специфичности выделены в классификаторах промышленной продукции в отдельную группу. ЭММ отличаются от электрических машин средней и большой мощности большим многообразием выполняемых функций, конструктивных исполнений, особенностями применения и эксплуатации.

Рассматривая область применения разрабатываемого двигателя с заданной мощностью 90 Вт в качестве исполнительного двигателя для вакуумного вентиля с электрическим приводом типа ЭП были рассмотрены техническое описание и инструкция по эксплуатации привода. Для определения требуемых параметров к двигателю.

Техническое описание вакуумного вентиля с электрическим приводом

1. Назначение – вакуумные вентили с электрическим приводом предназначены для герметического перекрытия вакуумных коммуникаций при давлении рабочей среды $760 \div 5 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.

Детали и узлы вентиля выполнены из конструкционных сталей, поэтому эксплуатировать вентили разрешается только в средах, не воздействующих на материалы конструкции.

2. Электромеханический привод допускает дистанционное или ручное открытие или закрытие вентиля. Концевые микропереключатели обеспечивают автоматическое выключение электродвигателя в уплотненном

или открытом положении клапана вентиля. Вентиль сохраняет работоспособность при температуре $+5 \div +40$ °С.

3. Технические данные:

Мощность электродвигателя 80 Вт;

Напряжение 220/380 В;

Время открывания или закрывания 7 секунд.

4. По конструкции редуктор включает в себя червячную передачу, фрикционную муфту, маховичок ручного управления вентилем и механизм автоматического выключения электродвигателя с микропереключателем. Он крепится к вентилю четырьмя шпильками или болтам и закрывается кожухом. Электродвигатель соединяется с червяком редуктора жесткой муфтой.

Клапаны с электроприводом являются одним из самых востребованных типов трубопроводного оборудования.

На основе заданных параметров системы необходимо спроектировать двигатель с более высокими энергетическими показателями: КПД, коэффициентом мощности и провести исследование электромеханических параметров по быстродействию.

Учитывая данные требования и сравнивая классическую теорию расчета ранее используемую в курсовых работах, приведенную в учебнике И.П. Копылова [2] с методикой расчета, изложенной и использованной в качестве базового расчета в учебном пособии В.Н. Дмитриева [1] при проведении начальных этапов проектирования дается информация больше рекомендательного характера при подборе дополнительных данных.

Расчет маломощных машин значительно отличается от проектирования машин средней и большой мощности в связи с тем, что ряд величин малых мощностей до конца не разработан - нет строгой теории, и при расчетах используются упрощения. Это установлено многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями в этой области [3].

Общие для всех электрических микромашин особенности их теории и расчета:

Шкалы мощностей и установочных размеров для асинхронных двигателей не могут быть одновременно выбраны из рядов предпочтительных чисел, так как такой выбор соответствовал постоянству показателя степени в приведенных выражениях которых предназначаются проектируемые двигатели, шкалу установочных размеров целесообразно выбирать из рядов предпочтительных чисел. Шкала мощностей должна иметь переменный ряд коэффициентов нарастания мощности, соответствующий закону изменения мощности в зависимости от размеров двигателя. В противном случае наблюдается повышенный расход материалов на двигателе различных модификаций и исполнений.

Технологические Факторы.

Класс точности изготовления основных элементов АД практически не зависит от мощности двигателя в пределах от десятка ватт и сотен киловатт. Технологические допуски на размеры изменяются пропорционально корню кубическому из размера, т.е. относительная величина допусков быстро возрастает с уменьшением мощности двигателей.

Такая же закономерность характерна для отклонений величины и формы воздушного зазора, так как в рассматриваемых сериях величина воздушного зазора практически пропорциональна диаметру машины.

В серии, охватывающей высоты оси вращения от 50 до 55 мм относительные величины отклонений от размеров возрастают в 3 - 4 раза. Особенно сильно это отражается на размерах, входящую в радиальную цепь машины. Значительно искажается воздушный зазор: эффективная величина его увеличивается на 23 - 30% и более. Поэтому уже при электромагнитных расчетах двигателей малой мощности учитываются технологические отклонения размеров и формы воздушного зазора. Этот фактор отражается также на конструировании подшипников узлов и замковых соединений.

Еще один важный технологический фактор – это ограничение уменьшения толщины оболочек и ребер минимально допустимыми размерами, определяемыми литьем под давлением.

В частности, толщина станины, подшипниковых щитов и охлаждающих ребер в двигателях малой мощности существования больше требуемых по условиям прочности конструкции, что приводит к еще большему ее утяжелению. Здесь необходимо создание новых легких сплавов, допускающих изготовление литьем под давлением деталей толщиной 1-1,5 мм и объемом 0,1 - 0,15 дм³.

Материалы.

Механические напряжения в элементах малых машин ниже, чем в машинах больших мощностей. Напряжения от массы конструкции пропорциональны линейному размеру машин.

Это обстоятельство позволяет применять для всех элементов оболочки двигателя алюминиевые или другие легкие сплавы. Единственное требование – технологичность сплава, особенно для заливки под давлением.

К изоляционным материалам двигателя малой мощности не предъявляют особых требований, так как на высокое напряжение их выполнить не возможно из-за большого числа витков, а для средних напряжений 220, 380 В изоляция не занимает много места в пазу. Толщина изоляционных материалов, как для корпусной изоляции, так и для витковой практически не будет уменьшаться, так как это не дает преимуществ при проектировании. Более важным является требование повышения механической прочности, как витковой, так и корпусной изоляции без увеличения толщины для обеспечения автоматизации обмоточно - изолировочных работ.

Жесткие требования предъявляются к электротехнической стали для машин малой мощности. В современных сериях АД индукция в ферромагнитных участках магнитопровода не снижается при уменьшении номинальной мощности машины и даже несколько возрастает. Это является следствием экономического подхода к проектированию: за счет увеличения индукции несколько замедляется возрастание массы на единицу мощности. В то же время быстро повышается относительный намагничивающий ток машины. Так, если в двигателях мощностью около 100 кВт намагничивающих

ток не превосходит 20 - 25% величины номинального тока машины, то в отдельных двигателях мощностью в несколько десятков ватт ток при холостом ходе может быть даже больше номинального; в этих машинах активное сопротивление обмотки статора больше, чем индуктивное сопротивление рассеяния, и при нагрузке э. д. с., а вместе с ним и намагничивающий ток уменьшаются, причем последний настолько, что сложение с перпендикулярным по фазе активным током нагрузки не компенсирует его уменьшения.

Влияние величины *намагничивающего тока на КПД*. ряд показателей усиливается еще и тем, что в больших машинах индуктивное сопротивление обмотки статора в полном соответствии с теорией геометрически подобных машин изменяется обратно пропорционально пятой степени линейного размера, а в двигателях малой мощности из-за чрезмерного расхода материалов оптимальной оказывается другая закономерность, приводящая к еще более быстрому возрастанию сопротивления.

Все это обуславливает жесткие требования к улучшению кривой намагничивания электротехнической стали для двигателей малых мощностей, за счет ее удорожания.

Из сказанного следует, что в асинхронных двигателях малой мощности необходимо применять электротехническую сталь с наибольшим возможными индукциями и невысокими удельными потерями. При этом предпочтительно отжигать и оксидировать сталь после штамповки. И отжигаться, и оксидироваться должны листы статора и ротора. Обязательная оксидация обусловлена необходимостью снижения добавочных потерь от токов, замыкающихся через пакет стали.

Конструкция.

Специфические особенности малых машин противоположность проектирования обуславливают ряд удобств в их конструировании. Малые механические напряжения и низкие перегревы позволяют широко применять дешевые термопластичные пластмассы. В этом вопросе в настоящее время имеется одна проблема: уменьшение холодной текучести пластмасс, решение

которой позволит армировать пластмассами поверхность под подшипники в шите, увеличить ток службы двигателя и уменьшить шумы и вибрации. Пока что выпускаемые промышленностью дешевые пластмассы не позволяют создать подобную конструкцию двигателей для широкого применения.

Перспективы исследований по применению неметаллических материалов в других элементах двигателей, особенно в упрощенных конструкциях для приводов, не требующих продолжительной работы. Особенность малых машин заключается также в том, что наибольшие механические напряжения позволяют применять для ряда практически любую конструкционную сталь. Здесь нет проблем прогиба вала и критических частот вращения.

В тоже время конструирование двигателей малой мощности встречается ряд трудностей, связанных в основном с проблемой размещения. Из-за отсутствия места число пазов на полюс и фазу доходит до двух и даже до одного, что приводит к ухудшению кривой намагничивания и, следовательно, резкому увеличению добавочных потерь и моментов от магнитных полей высших гармоник. Вместе с тем не существует методов ощутимого уменьшения этих видов добавочных потерь и моментов. Скос пазов в двигателях малой мощности приводит к существенному уменьшению взаимоиндуктивности обмоток статора и ротора и малоэффективен из-за наличия проводимости через пакет стали при залитой под давлением обмотке ротора. Кроме того, ухудшается точность проектных работ: расчетные значения КПД, пускового и минимального моментов могут заметно отличаться от измеренных величин.

Частичное решение проблемы может дать введение термообработки готового ротора: разогрев до 200-300 градусов цельсия с последующим резким охлаждением. Для этого требуется оснащение заводов специальными технологическим оборудованием. Введение такого процесса окупится, так как КПД двигателя малой мощности увеличивается согласно проведенным исследованиям в среднем не менее чем на 1,5 - 2%. Малое число пазов на

полюс и фазу затрудняет также укладку обмотки статора, так как пазы имеют небольшую высоту и почти заполняются. Этот фактор необходимо учитывать в расчете машин с целью уменьшения объема меди и ширины пазов.

Определенное сокращение расхода конструкционных материалов можно получить путем уменьшения длины пакетов двухполюсных машин по сравнению с пакетами четырехполюсных. При конструировании малых машин некоторые трудности встречаются при вводе фундаментных болтов и обработке замковых поверхностей на станине. С этой Точки зрения целесообразно было бы изменение некоторых установочных размеров относительно имеющихся рекомендаций МЭК: увеличение размера от конца вала до оси переднего отверстия в лапах, уменьшение размера между осями отверстий в лапах по длине машины и увеличение по ширине. Следует так же отметить, что наличие коробки выводов на двигателях малой мощности вряд ли оправдано, так как диаметр выводных проводов настолько мал, что можно было бы просто выпустить три (или шесть) конца длиной 0,3 – 0,5 м.

По мере дальнейшего развития автоматических систем растет необходимость создания специальной теории и расчета электрических микромашин различных типов [3]. Без этого невозможно создание высококачественных микромашин.

2. Электромагнитный расчет

2.1 Выбор главных размеров

К главным размерам машины относят внутренний диаметр расточки статора D и расчетная длина магнитопровода l_σ и воздушного зазора δ .

2.1.1 Предварительно выбираем высоту оси вращения h и внешний диаметр статора D_a при $P_{2H} = 90 \text{ Вт}$ [1, с. 8, таблица 1.1]:

$$h = 50 \text{ мм}; D_a = 81 \text{ мм}.$$

2.1.2 Внутренний диаметр статора [1, с. 7, формула 1.2]:

$$D = K_D \cdot D_a = 0,54 \cdot 0,081 = 43,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (2.1)$$

примем $D = 44 \text{ мм}$.

где K_D – коэффициент, характеризующий отношение внутреннего и внешнего диаметра сердечника статора при $2p = 2$ [1, с. 8, таблица 1.2]:

$$K_D = 0,54 \quad (0,52 - 0,57)$$

2.1.3 Полусное деление [1, с. 8, формула 1.3]:

$$\tau = \pi \cdot D / (2 \cdot p) = 3,14 \cdot 0,044 / 2 = 69,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (2.2)$$

2.1.4 Расчётная мощность [1, с. 8, формула 1.4]:

$$P' = P_{2H} \cdot \frac{K_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = \frac{90 \cdot 0,96}{0,65 \cdot 0,75} = 177,23 \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

где P_{2H} - заданная мощность на валу двигателя, коэффициент K_E характеризует отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению [1, с. 8, формула 1.5]:

$$K_E = \frac{X_{12}}{\sqrt{r_1 + (x_1 + x_{12})^2}} = \frac{1692,31}{\sqrt{98,05 + (60,14 + 1692,31)^2}} = 0,96, \quad (2.4)$$

где значения параметров $r_1 = 98,05 \text{ Ом}$, $x_1 = 60,14 \text{ Ом}$ и $x_{12} = 1692,31 \text{ Ом}$ из справочных данных наиболее близкого серийного асинхронного двигателя [1, с. 84, таблица П.2].

Значения η и $\cos \varphi$ [1, с. 83 - 87, таблицы П.1- П.5]:

$$\eta = 0,65 \text{ и } \cos \varphi = 0,75$$

2.1.5 Предварительный выбор электромагнитных нагрузок

Электромагнитные нагрузки: индукция в воздушном зазоре и линейная нагрузка – эти величины характеризуют использование магнитной системы и обмотки, от их соотношения зависят рабочие и пусковые характеристики двигателя. Согласно рекомендациям [1, с. 9] при $2p = 2$, предварительные значения:

$$\text{линейной нагрузки} \quad A_n = 11,5 \cdot 10^3 \text{ А/м,}$$

$$\text{индукции в воздушном зазоре} \quad B_{\sigma n} = 0,65 \text{ Тл.}$$

2.1.6 Обмоточный коэффициент для однослойной обмотки статора при $2p = 2$ [1, с.10, таблица 1.3]:

$$k_{obl} = 0,96 \quad (0,95 \dots 0,96)$$

2.1.7 При синусоидальном поле, значения коэффициентов предварительно принимаем

$$a_\delta = \frac{2}{\pi} = \frac{2}{3,14} = 0,637 \quad (2.5)$$

2.1.8 Коэффициент формы поля:

$$K_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = \frac{3,14}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,11 \quad (2.6)$$

2.1.9 Синхронная угловая частота вращения вала двигателя, при $f_1 = 50 \text{ Гц}$ [1, с.13, формула 1.7]:

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3000}{60} = 314,2 \text{ рад/с} \quad (2.7)$$

2.1.10 Длина магнитопровода [1, с.16, формула 1.6]:

$$l_\sigma = \frac{P/}{D^2 \cdot \Omega \cdot K_B \cdot k_{obl} \cdot A \cdot B_\sigma} = \frac{177,23}{(44 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 314,2 \cdot 1,11 \cdot 0,96 \cdot 11,5 \cdot 10^3 \cdot 0,65} = 36,6 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

примем $l_\sigma = 37 \text{ мм.}$ (2.8.)

2.1.11 Проведем проверку:

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = \frac{37}{69,1} = 0,5 \quad (0,45 - 0,95)$$

2.1.12 При выборе воздушного зазора δ учтем необходимость минимизации этой величины для уменьшения намагничивающего тока и повышения коэффициента мощности, и с другой стороны - усложнение и удорожание изготовления двигателя и усиление высших гармонических поля.

Воздушный зазор [1, с.14, формула 1.8]:

$$\delta = 0,2 + \frac{D}{2000} = 0,2 + \frac{44}{2000} = 0,22 \text{ мм.} \quad (2.9)$$

Согласно рекомендациям [1, с.14] δ выбирается кратной 0,05 в пределах 0,2...0,5 мм:

Примем $\delta = 0,25 \text{ мм.}$

2.1.13 Таким образом, полученное значение $\lambda = 0,5$ находится в рекомендуемых пределах (0,45 – 0,95), что определяет правильный выбор главных размеров D и l_σ .

2.1.14 Конструктивную длину сердечника ротора в машинах с $h < 250 \text{ мм}$ берут равной длине сердечника статора, т.е. $l_1 = l_2 = l_\sigma$.

2.2 Расчет размеров зубцовой зоны и обмотки 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. Для этого, выберем предварительно зубцовое деление t_{z1} в зависимости от типа обмотки и полюсного деления. Для равномерного распределения катушек обмотки по длине окружности зазора необходимо большое число пазов, с другой стороны, если ширина паза будет слишком малой, то заполнение паза медью обмотки ухудшится, в следствии этого может недопустимо уменьшиться механическая прочность зубцов, что характерно для машин малой мощности. С увеличением числа пазов увеличивается сложность штампа и трудоемкость изготовления и укладки обмотки [1, с. 14-15].

2.2.1 Предельные значения зубцового деления статора, при $\tau = 69,1 \text{ мм}$ [1, с. 15, рисунок 1.6]:

$$t_{z1min} = 0,74 \text{ см; } t_{z1max} = 0,94 \text{ см.}$$

2.2.2 Определим возможное число пазов статора Z_1 [1, с.15, формула 1.9]:

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1max}} = \frac{3,14 \cdot 44}{9,4} = 14,7; \quad (2.10)$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{z1min}} = \frac{3,14 \cdot 44}{7,4} = 18,68.$$

Выбираем окончательное число пазов статора Z_1 ближайшим из приведенного ряда [1, с.16, таблица 1.5]:

$$Z_1 = 18 \text{ кратно числу фаз,}$$

$$\text{тогда } q_1 = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{18}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 3 \text{ (значение должно быть целым)} \quad (2.11)$$

2.2.3 Окончательное значение зубцового деления [1, с.15, формула 1.10]:

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{Z_1} = \frac{3,14 \cdot 44}{18} = 7,7 \text{ мм} \quad (2.12)$$

2.2.4 Номинальный ток обмотки статора [1, с. 16, формула 1.12]:

$$I_{Iном} = \frac{P_{2н}}{m \cdot U_{Iном} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{90}{3 \cdot 220 \cdot 0,75 \cdot 0,65} = 0,28 \text{ А,} \quad (2.13)$$

где η и $\cos \varphi$ определены в начале расчета.

2.2.5 Предварительное число эффективных проводников в пазу [1, с. 16, формула 1.11]:

$$U_{nl} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{Iном} \cdot Z_1} = \frac{3,14 \cdot 44 \cdot 10^{-3} \cdot 11,5 \cdot 10^3}{0,28 \cdot 18} = 315,4, \quad (2.14)$$

где A - принятое ранее значение линейной нагрузки.

Полученное значение округляем до ближайшего целого, тогда

$$U_{nl} = 315$$

Число параллельных ветвей :

$$a = 1$$

Окончательное значение числа проводников:

$$U_n = a \cdot u_{nl} = 315$$

2.2.6 Окончательное значение числа витков в фазе обмотки [1, с.16, формула 1.13]:

$$W_1 = \frac{U_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{315 \cdot 18}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 945 \quad (2.15)$$

2.2.7 Окончательное значение линейной нагрузки [1, с.16, формула 1.14]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{Iном} \cdot W_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 0,28 \cdot 945 \cdot 3}{3,14 \cdot 44 \cdot 10^{-3}} = 11,485 \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}} \text{ (10 ... 20) } \cdot 10^3 \quad (2.16)$$

2.2.8 Полученное значение линейной нагрузки сопоставим с предварительно

выбранным:

$$\Delta A = \left| \frac{(A_{\Pi} - A)}{A_{\Pi}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{(11500 - 11485)}{11500} \right| \cdot 100 \% = 0,13 \% \quad (2.17)$$

2.2.9 Магнитный поток [1, с.16, формула 1.15]:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1\text{НОМ}}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{061} \cdot f_1} = \frac{0,96 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 945 \cdot 0,96 \cdot 50} = 0,00105 \text{ Вб}, \quad (2.18)$$

2.2.10 Индукция в воздушном зазоре [1, с.16, формула 1.16]:

$$B_{\sigma} = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_{\sigma}} = \frac{1 \cdot 0,00105}{0,044 \cdot 0,037} = 0,655 \text{ Тл} \quad (0,65 \dots 0,9) \quad (2.19)$$

2.2.11 Полученное значение индукции сопоставим с предварительно выбранным:

$$\Delta B_{\delta} = \left| \frac{(B_{\delta\Pi} - B_{\delta})}{B_{\delta\Pi}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{0,65 - 0,655}{0,65} \right| \cdot 100 \% = 0,84 \% \quad (2.20)$$

2.2.12 Плотность тока в обмотке предварительно [1, с. 83, таблица П.1]:

$$J_{In} = 4,4 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

2.2.13 Площадь поперечного сечения эффективного проводника предварительно [1, с. 17, формула 1.17]:

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{НОМ}}}{a \cdot J_1} = \frac{0,28}{1 \cdot 4,4 \cdot 10^6} = 6,363 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2, \quad (2.21)$$

принимаем $n_{\text{эл}} = 1$

2.2.14 Сечение эффективного проводника (окончательно):

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = \frac{6,36 \cdot 10^{-8}}{1} = 6,36 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \quad (2.22)$$

Выбираем обмоточный провод марки ПЭТ-155 [1, с. 89, таблица П.7]

$$d_{\text{эл}} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad q_{\text{эл}} = 6,16 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2, \quad d_{\text{из}} = 0,315 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

2.2.15 Плотность тока в обмотке статора окончательно [1, с.356, формула 9.27]:

$$J_1 = \frac{J_{1\text{НОМ}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = \frac{0,28}{1 \cdot 6,16 \cdot 10^{-8} \cdot 1} = 4,54 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (2.23)$$

2.2.16 Полученное значение плотности тока сопоставим с предварительно выбранным:

$$\Delta J_1 = \left| \frac{(J_{1\Pi} - J_1)}{J_{1\Pi}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{(4,4 - 4,54) \cdot 10^6}{4,4 \cdot 10^6} \right| \cdot 100 \% = 3,2 \% \quad (2.24)$$

Полученные значения электромагнитных нагрузок: линейной нагрузки

$$A = 11,485 \cdot 10^3 \frac{\text{А}}{\text{м}} \quad (\Delta A = 0,13 \%) \text{ и индукции } B_{\sigma} = 0,655 \text{ Тл} \quad (\Delta B_{\delta} = 0,8 \%)$$

находятся в допустимых пределах не более 10 % от рекомендованных значений [1, с. 83, таблица П.1)], т. е. практически не отличаются от первоначально заданных, что позволяет перейти к определению размеров зубцовой зоны статора.

После окончательного выбора площади поперечного сечения неизолированного провода $q_{эл} = 6,16 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, числа элементарных проводников $n_{эл} = 1$, и числа параллельных ветвей обмотки $a = 1$ расчетное значение плотности тока в обмотке $J_1 = 4,54 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ находится в допустимых пределах, т.к. $\Delta J_1 = 3,2 \%$ не превышает 10%.

Размеры пазов в электрических машинах должны соответствовать следующим требованиям:

- 1) площадь паза должна соответствовать размерам и количеству проводников, размещаемых в пазу с учетом всей изоляции;
- 2) значение индукций в зубцах и ярме статора должны находиться в определенных пределах, зависящих от мощности, исполнения, типа машины и от марки электротехнической стали сердечника.

2.2.17 Выбираем форму полуовального паза [1, с. 18, рис. 1.7, в] с соотношением размеров, обеспечивающих параллельность боковых граней зубцов. Форма паза статора представлена на рисунке 2.1.

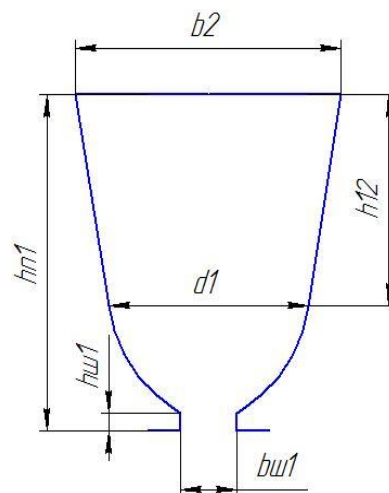


Рисунок 2.1. Форма паза статора.

2.2.18 Допустимые значения индукции для $2p = 2$ (предварительно) [1, с. 18, таблица 1.6]:

зубцы статора: $B_{Z1} = 1,8 \text{ Тл}$ допустимые пределы (1,75 – 1,85)

ярмо статора: $B_a = 1,6 \text{ Тл}$ допустимые пределы (1,4 – 1,6)

коэффициент заполнения сердечника из холоднокатаной изотропной электротехнической стали марки 2013 для статора и для ротора [1, с. 18]:

$$k_c = 0,97$$

2.2.19 Ширина зубцов статора [1, с. 17, формула 1.18]:

$$b_{Z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{Z1} \cdot l_\delta}{B_{Z1} \cdot l_{ст1} \cdot k_c} = \frac{0,6555 \cdot 7,7 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.25)$$

2.2.20 Высота ярма статора [1, с. 17, формула 1.19]:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{ст1} \cdot k_c} = \frac{0,00105}{2 \cdot 1,6 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 9,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.26)$$

2.2.21 Размеры полуовального паза.

Ширина шлица паза [1, с. 18, формула 1.20]:

$$b_{ш} = d_{из} + 1,1 \div 1,5 \text{ (мм)}, \quad (2.27)$$

где $d_{из}$ - диаметр изолированного проводника обмотки статора,

$$b_{ш1} = 0,315 + 1,385 = 1,7 \text{ мм}$$

Высота шлица

$$\text{принимаяем } h_{ш1} = 0,5 \text{ мм } (0,5 \div 0,6)$$

2.2.22 Размеры полуовального паза рисунок 2.1 [1, с. 19, формулы 1.26 - 1.29]:

$$d_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_{ш1}) - Z_1 \cdot b_{Z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{3,14 \cdot (44 + 2 \cdot 0,5) - 18 \cdot 2,8}{18 - 3,14} = 6,09 \text{ мм}, \quad (2.28)$$

принимаяем $d_1 = 6,1 \text{ мм}$;

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D_a - 2 \cdot h_a)}{Z_1} - b_{Z1} = \frac{3,14 \cdot (81 + 2 \cdot 9,1)}{18} - 2,8 = 8,12 \text{ мм}, \quad (2.29)$$

принимаяем $b_2 = 8,1 \text{ мм}$;

высота паза:

$$h_{n1} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{81 - 44}{2} - 9,1 = 9,4 \text{ мм}; \quad (2.30)$$

высота прямой части паза:

$$h_{12} = h_n - 0,5 \cdot (d_1 + 2 \cdot h_{ш}) = 9,4 - 0,5 \cdot (6,1 + 2 \cdot 0,5) = 5,9 \text{ мм}. \quad (2.31)$$

2.2.23 Площадь паза [1, с. 19, формула 1.30]:

$$S_{\Pi} = \frac{\pi \cdot d_1^2}{8} + 0,5 \cdot h_{12} \cdot (d_1 + b_2), \quad (2.32)$$

$$S_{\Pi} = \frac{3,14 \cdot 6,1^2}{8} + 0,5 \cdot 5,9 \cdot (6,1 + 8,1) = 56,5 \text{ мм}^2.$$

2.2.24 Площадь паза в свету с учетом припуска на сборку и площади на изоляцию на 10 – 20% меньше [1, с. 20, формула 1.36]:

$$S'_n = (0,8 \div 0,9) \cdot S_n \quad (2.33)$$

Коэффициент уменьшения полезной площади паза $k_s = 0,85$,

$$S'_n = 0,85 \cdot S_n = 0,85 \cdot 56,5 = 48,027 \text{ мм}^2$$

2.2.25 Коэффициент заполнения паза [1, с. 21, формула 1.37]:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 \cdot u_{\Pi}}{S_{\Pi}} = \frac{0,315^2 \cdot 10^{-6} \cdot 315}{48,027 \cdot 10^{-6}} = 0,65 \quad (2.34)$$

Структура изоляции паза для однослойных обмоток показана на рисунке 2.2. Пазовую изоляцию выполняют в виде коробочки из лавсановой пленки толщиной 0,19 мм, пазовый клин - из лавсана толщиной 0,25 мм.

Изоляция лобовых частей от пакета стали осуществляется за счет манжеты из пленкоэлектрокартона, выступающей на 3 - 4 мм из пазов. Картон толщиной 0,1 мм оклеивается триацетатной пленкой толщиной 0,03 мм с двух сторон. Клин в этом случае выполняют из фибры толщиной 0,5 мм. Лобовые части изолируют со стороны пакета статора торцовыми шайбами.

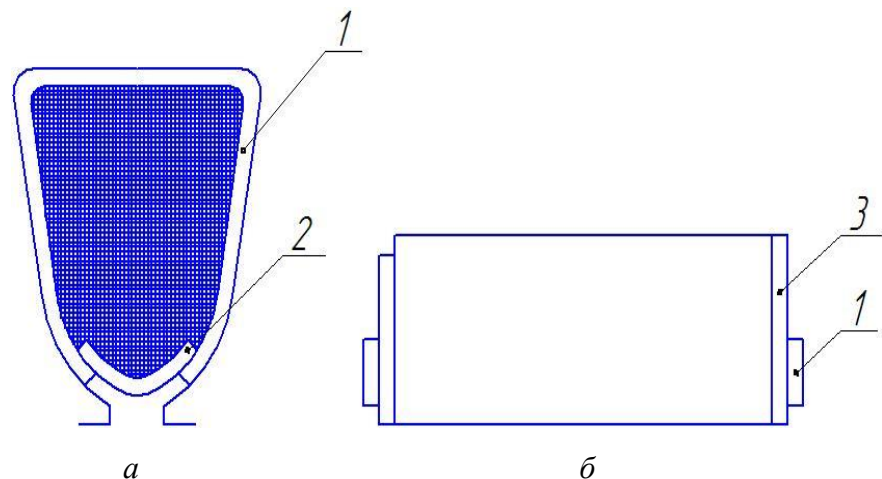


Рисунок 2.2. Изоляция паза:
а - поперечный разрез, б - вид сбоку:
1 - пазовая коробочка, 2 - клин, 3 - торцевая шайба.

2.2.26 Полученное значение коэффициента заполнения паза $k_3 = 0,65$ находится в рекомендованных пределах 0,62....0,68, что является контролем

правильности размещения обмотки в пазах 1, с. 21]. Принимаем полученные размеры паза.

Паз статора с заполнением представлен на рисунке 2.3. Заполнение паза указано в таблице 2.1. Схема однослойной обмотки статора представлена в приложении А. Форма и размеры паза статора - приложение Б.

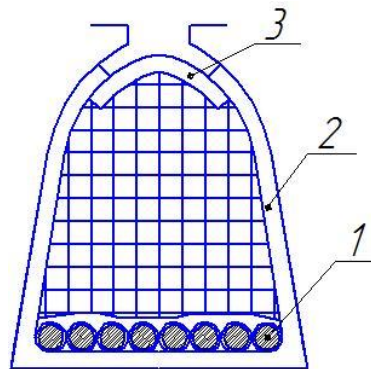


Рисунок 2.3. Паз статора с заполнением

Таблица 2.1 – заполнение паза статора (см. рис.2.3)

Позиция	Наименование	Материал
1	Обмоточный провод	ПЭТ - 155
2	Коробка пазовая	лавсановая пленка толщиной 0,19 мм
3	Клин пазовый	лавсан толщиной 0,25 мм.

2.3. Расчет ротора

2.3.1 Воздушный зазор по п. 2.1.12 расчета:

$$\delta = 0,25 \text{ мм}$$

2.3.2 Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 44 - 2 \cdot 0,25 = 43,5 \text{ мм} \quad (2.35)$$

2.3.3 Длина ротора:

$$l_\delta = l_2 = l_1 = 37 \text{ мм}$$

2.3.4 Внутренний диаметр сердечника ротора D_j равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал, D_B составляет 16-20% от диаметра ротора [1, с. 24, формула 1.52]:

$$D_B = (0,16 - 0,2) \cdot D_a \quad (2.36)$$

принимаем 19 %

$$D_j = D_B = 0,19 \cdot D_a = 0,19 \cdot 81 = 15,4 \text{ мм}, \quad (2.37)$$

2.3.5 Выбор числа пазов на роторе Z_2 тесно связан с выбором числа пазов на статоре. Соотношение Z_1 и Z_2 определяют с учетом уменьшения:

- 1) влияния поля гармоник высших порядков на кривую момента;
- 2) шумов и вибраций;
- 3) добавочных потерь в стали зубцов.

При заданном наружном диаметре ротора выбор числа пазов Z_2 из-за технологии изготовления ограничивается предельно допустимой шириной зубца.

Стержень короткозамкнутой обмотки образует одну фазу. Число фаз равно числу пазов ($m_2 = Z_2$), и обмотка каждой фазы имеет 0,5 витка, т. е. $W_2 = 1/2$, т. к. при $m_2 = Z_2$ к каждой фазе относится один стержень с двумя участками замыкающих колец, расположенных с разных торцов ротора.

Обмоточный коэффициент $k_{об2} = 1$, а условное число пазов на полюс и фазу [1, с. 22, формула 1.38]:

$$q_2 = \frac{Z_2}{2 \cdot p \cdot m_2} = \frac{1}{2p} = \frac{1}{2} = 0,5 \quad (2.38)$$

2.3.6 Пазы ротора выполняем без скоса, т.е. $k_{ск} = 1$ из рекомендованного диапазона при $Z_1 = 18$ число пазов [1, с. 22, таблица 1.7]:

$$Z_2 = 15$$

2.3.7 Зубцовое деление ротора:

$$t_{Z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3,14 \cdot 43,5}{15} = 9,1 \text{ мм} \quad (2.39)$$

2.3.8 Коэффициента приведения токов [1, с. 22, формула 1.39]:

$$Y_1 = \frac{2 \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 945 \cdot 0,96}{15} = 362,88 \quad (2.40)$$

2.3.9 Ток в стержне ротора [1, с. 22, формула 1.40]:

$$I_2 = k_i \cdot I_{1н} \cdot Y_1 = 0,81 \cdot 0,28 \cdot 362,88 = 82,3 \text{ А}, \quad (2.41)$$

где k_i - коэффициент, учитывающий наличие тока намагничивания и

сопротивления обмоток на отношение $\frac{I_1}{I_2}$:

$$k_i = 1,08 \cdot \cos \varphi = 1,08 \cdot 0,75 = 0,81 \quad (2.42)$$

2.3.10 Площадь поперечного сечения стержня (предварительно) [1, с. 22, формула 1.41]:

$$q_{\text{сп}} = \frac{I_2}{J_{2\text{п}}} = \frac{82,3}{3,5 \cdot 10^6} = 23,539 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \quad (2.43)$$

где плотность тока в стержнях ротора [1, с. 22] принимаем:

$$J_{2\text{п}} = 3,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (3 - 5 \text{ А/мм}^2)$$

2.3.11 Плотность тока в короткозамыкающих кольцах $J_{\text{кл}}$ выбирают в среднем на 15 - 20 % меньше, чем в стержнях. Это объясняется тем, что они являются своего рода радиаторами, которые отводят тепло стержней, усиливая их охлаждение и имеют лучшие условия охлаждения [1, с. 23], примем 15%:

$$J_{\text{кл.п}} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 3,525 \cdot 10^6 = 2,975 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (2.44)$$

2.3.12 Площадь поперечного сечения короткозамыкающих колец (предварительно) [1, с. 23, формула 1.42]:

$$q_{\text{клп}} = \frac{I_{\text{кл}}}{j_{\text{клп}}} = \frac{197,9}{2,98 \cdot 10^6} = 66,529 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \quad (2.45)$$

где ток в короткозамыкающем кольце [1, с. 23, формула 1.43]:

$$I_{\text{кл}} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{82,3}{0,4158} = 197,9 \text{ А}, \quad (2.46)$$

$$\text{где } \Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot \rho}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{180^\circ \cdot 1}{15}\right) = 0,4158 \quad (2.47)$$

2.3.13 Выбираем овальные пазы ротора [1, с. 25, рисунок 1.9, г].

Форма паза ротора показана на рисунке 2.4.

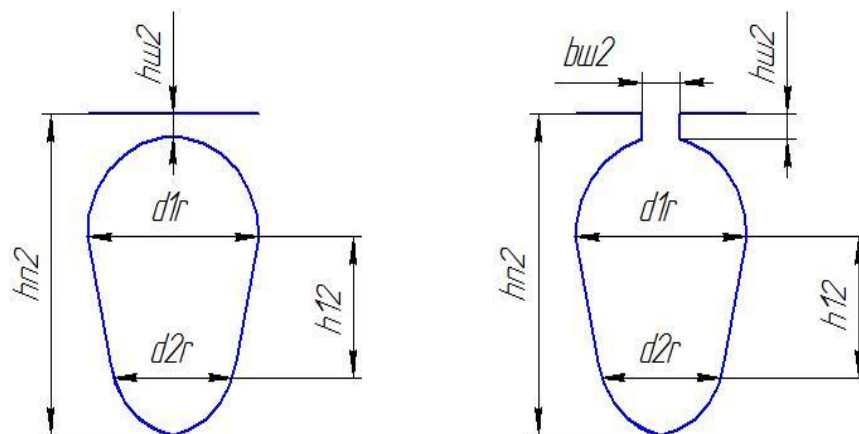


Рисунок 2.4 .Форма паза ротора.

Размер d_{2R} берется не менее 2 мм по условиям наилучшего заполнения паза алюминием. По условиям прочности штампа минимально возможная высота мостика $h_{ш2} = 0,3 - 0,5$ мм. При насыщении этот мостик создает эффект открытия паза. Ширина $b_{ш2}$ прорези паза берется $0,4 - 1$ мм, [1, с. 23 - 24].

Принимаем: $b_{ш2} = 1$ мм; $h_{ш2} = 0,5$ мм.

2.3.14 Значение индукции (допустимое) [1, с. 18, таблица 1.6]):

$$B_{Z2} = 1,8 \text{ Тл} \quad \text{допустимые пределы (1,75-1,85)}$$

2.3.15 Ширина зубца ротора при $l_2 = l_{ст2} = 37$ мм [1, с. 57]:

$$b_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z2} \cdot l_{\delta}}{B_{Z2} \cdot l_{ст2} \cdot k_c} = \frac{0,655 \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 3,4 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 3,4 \text{ мм} \quad (2.48)$$

2.3.16 Размеры овального паза [1, с.18, формулы 1.48 - 1.52], см. рисунок 2.4.

$$d_{1R} = \frac{[D - 2(\delta + h_{ш2})] \cdot \pi - b_{Z2} \cdot Z_2}{Z_2 + \pi} = \frac{[44 - 2 \cdot (0,25 + 0,5)] \cdot 3,14 - 3,4 \cdot 15}{15 + 3,14} = 4,45 \text{ мм} \quad (2.49)$$

Принимаем $d_{1R} = 4,5$ мм.

$$d_{2R} = \sqrt{\frac{d_{1R}^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_{сп}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{4,4^2 \cdot \left(\frac{15}{3,14} + \frac{3,14}{2}\right) - 4 \cdot 23,5}{\frac{15}{3,14} - \frac{3,14}{2}}} = 3,28 \text{ мм} \quad (2.50)$$

Принимаем $d_{2R} = 3,3$ мм.

Расстояние между центрами окружностей:

$$h_{12R} = (d_{1R} - d_{2R}) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (4,5 - 3,3) \cdot \frac{15}{2 \cdot 3,14} = 2,87 \text{ мм} \quad (2.51)$$

Принимаем $h_{12} = 2,9$ мм

Высота паза, равная высоте зубца ротора:

$$h_{п2} = h_{Z2} = \frac{1}{2} \cdot (d_{1R} + d_{2R}) + h_{12R} + h_{ш2} \quad (2.52)$$

$$h_{п2} = \frac{1}{2} \cdot (4,5 + 3,3) + 2,9 + 0,5 = 7,3 \text{ мм}$$

2.3.17 Уточним площадь поперечного сечения паза (должна быть равна сечению стержня по п.п. 2.3.10 расчета $q_{сп} = 23,539 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$):

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (d_{1R}^2 + d_{2R}^2) + \frac{1}{2} \cdot h_{12R} \cdot (d_{1R} + d_{2R}) \quad (2.53)$$

$$q_c = \frac{3,14}{8} \cdot (4,5^2 + 3,3^2) + \frac{1}{2} \cdot 2,9 \cdot (4,5 + 3,3) = 23,347 \text{ мм}^2.$$

2.3.18 Уточним плотность тока в стержне:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{82,3}{23,347 \cdot 10^{-6}} = 3,4964 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (2.35)$$

2.3.19 Полученное значение плотности тока сопоставим с предварительно выбранным:

$$\Delta J_2 = \left| \frac{J_{2c} - J_2}{J_{2c}} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{(3,5 - 3,4964) \cdot 10^6}{3,5 \cdot 10^6} \right| \cdot 100 \% = 0,1 \% \quad (2.54)$$

2.3.20 Размеры короткозамыкающих колец прямоугольной формы определяются из заданного сечения кольца и его высоты, которая берется на 20 - 25 % больше высоты паза ротора [1, с. 23], принимаем 25% :

Высота [1, с. 23, формула 1.44]:

$$h_{кл} = 1,25 \cdot h_{п2} = 1,25 \cdot 7,3 = 9,1 \text{ мм.} \quad (2.55)$$

Ширина [1, с. 23, формула 1.45]:

$$b_{кл} = \frac{q_{клп}}{h_{кл}} = \frac{66,529 \cdot 10^{-6}}{9,1 \cdot 10^{-3}} = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Сечение:

$$q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл} = 9,1 \cdot 7,3 = 66,43 \text{ мм.}^2 \quad (2.57)$$

2.3.21 Средний диаметр короткозамкнутого кольца [1, с. 31, формула 1.86]:

$$D_{кл.ср} = D_2 - h_{кл} = (43,5 - 9,1) = 34,4 \text{ мм.} \quad (2.58)$$

После окончательного расчета размеров паза ротора и короткозамыкающих колец сравниваем площадь поперечного сечения стержня $q_c = 23,347 \text{ мм}^2$, сечение короткозамкнутого кольца $q_{кл} = 66,43 \text{ мм}^2$, плотность тока в стержне ротора $J_2 = 3,4964 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$ ($\Delta J_2 = 0,1 \%$) с их предварительными расчетами $q_{сп} = 23,539 \text{ мм}^2$, $q_{клп} = 66,529 \text{ мм}^2$ ($q_{сп} - q_c = 23,539 - 23,347 = 0,19 \text{ мм}^2$, $q_{клп} - q_{кл} = 66,529 - 66,43 = 0,09 \text{ мм}^2$). Небольшое отличие есть, связанное с погрешностью при округлении результатов расчета и имеют значения в меньшую сторону. Принимаем полученные размеры паза ротора и короткозамыкающих колец.

2.4 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводят для определения магнитного напряжения на всех ее участках, соединенных последовательно: зубцы статора и ротора, воздушный зазор, спинки статора и ротора. Магнитные напряжения зависят от магнитного потока в участке. При расчете магнитного напряжения цепи F_{Σ} берут сумму магнитных напряжений участков, определенных для одного потока. В АД ток, создающий намагничивающую силу возбуждения, потребляется из питающей сети. Он зависит от МДС магнитной цепи, но при неизменной ЭДС обмотки статора намагничивающий ток изменяться не будет. Поэтому для определения I_{μ} рассчитывают МДС магнитной цепи для одного значения потока, соответствующего режиму холостого хода.

2.4.1 Индукции в зубцах статора и ротора [1, с. 25, формулы 1.53, 1.54]:

$$B_{Z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z1} \cdot l_{\delta}}{b_{Z1} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_c} = \frac{0,6555 \cdot 7,7 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3}}{2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,84 \text{ Тл} \quad (2.59)$$

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z2} \cdot l_{\delta}}{b_{Z2} \cdot l_{\Sigma} \cdot K_c} = \frac{0,6555 \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3}}{3,4 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,81 \text{ Тл} \quad (2.60)$$

2.4.2 Индукции в ярме статора и ротора [1, с. 26, формулы 1.55, 1.57]:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{\delta} \cdot K_c} = \frac{0,00105}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,62 \text{ Тл} \quad (2.61)$$

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot l_{\delta} \cdot K_c} = \frac{0,00105}{2 \cdot 13,5 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97} = 1,08 \text{ Тл} \quad (2.62)$$

При посадке сердечника непосредственно на вал часть магнитных линий потока замыкается через вал.

2.4.3 Расчетная высота ярма ротора [1, с. 26, формулы 1.58]:

$$h_j = \left(\frac{D_2}{2} - h_{\Sigma 2} \right) \cdot \frac{2 + \rho}{3,2 \cdot \rho} = \left(\frac{43,5}{2} - 7,3 \right) \cdot \frac{2 + 1}{3,2 \cdot 1} = 13,5 \text{ мм} \quad (2.63)$$

Поверхности статора и ротора ограничивающие воздушный зазор, не гладкие, а имеют пазы. Магнитное сопротивление участков такого зазора в поперечном сечении машины различно, поэтому распределение индукции по площади воздушного зазора неравномерно. Наибольшая неравномерность возникает из-за наличия зубцов на статоре и роторе. Над коронками зубцов

магнитные линии потока сгущаются, а над прорезями пазов плотность линии уменьшается. В кривой индукции в воздушном зазоре появляются провалы. Магнитное сопротивление и магнитное напряжение воздушного зазора при неравномерной индукции возрастают.

Увеличение магнитного напряжения учитывается введением коэффициента воздушного зазора. Этот коэффициент, полученный расчётом полей в зазорах с различным соотношением ширины зубцов и пазов, показывает насколько возрастает магнитное напряжение зазора при зубчатой поверхности статора или ротора по сравнению с магнитным напряжением зазора между гладкими поверхностями.

2.4.4 Коэффициент воздушного зазора [1, с. 26, формулы 1.60, 1.61]:

$$k_{\delta} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{7,7}{7,7 - 3,9186 \cdot 0,25} = 1,019, \quad (2.64)$$

где

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{III}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{III}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{1,7}{0,25}\right)^2}{5 + \frac{1,7}{0,25}} = 3,9186 \quad (2.65)$$

2.4.5 Магнитное напряжение воздушного зазора [1, с. 26, формулы 1.59]:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 1,6 \cdot 10^6 \cdot 0,655 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,019 = 263,3 \text{ А} \quad (2.66)$$

2.4.6 Расчетная высота зубца статора и ротора:

$$\begin{aligned} h_{Z1} &= h_{п1} = 8,6 \text{ мм}, \\ h_{Z2} &= h_{п2} - 0,15 = 7,3 - 0,15 = 7,05 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (2.67)$$

2.4.6 Напряжённость поля в зубцах для стали 2013 [2, с. 698, таблица П1.7]:

$$\begin{aligned} B_{Z1} &= 1,84 \text{ Тл} \text{ находим } H_{Z1} = 1720 \text{ А/м}, \\ B_{Z2} &= 1,81 \text{ Тл} \text{ находим } H_{Z2} = 1520 \text{ А/м}. \end{aligned}$$

2.4.7 Магнитное напряжение зубцовых зон статора и ротора [1, с. 26, формулы 1.62, 1.64]:

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{Z1} \cdot H_{Z1} = 2 \cdot 8,6 \cdot 10^{-3} \cdot 1720 = 29,584 \text{ А}, \quad (2.68)$$

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{Z2} \cdot H_{Z2} = 2 \cdot 7,05 \cdot 10^{-3} \cdot 1670 = 21,736 \text{ А}. \quad (2.69)$$

2.4.8 Коэффициент насыщения зубцовой зоны [1, с. 27, формула 1.65]:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{29,584 + 21,736}{263,3} = 1,2 \quad (2.70)$$

2.4.9 Напряжённость поля ярма для стали 2013 [2, с. 697, таблица П1.6]:

$$B_a = 1,62 \text{ Тл} \text{ находим } H_a = 826 \text{ А/м},$$

$$B_j = 1,08 \text{ Тл} \text{ находим } H_j = 213 \text{ А/м}.$$

2.4.10 Магнитное напряжение ярма статора [1, с. 27, формула 1.66]:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,1129 \cdot 826 = 93,29 \text{ А}, \quad (2.71)$$

где длина средней магнитной силовой линии в ярме [1, с. 27, формула 1.67]:

$$L_a = \pi \cdot \frac{D_a - h_a}{2 \cdot p} = 3,14 \cdot \frac{81 - 9,1}{2 \cdot 1} = 112,9 \text{ мм}. \quad (2.72)$$

2.4.11 Магнитное напряжение ярма ротора [1, с. 27, формула 1.68]:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 34,8 \cdot 10^{-3} \cdot 213 = 7,4076 \text{ А}, \quad (2.73)$$

где длина средней магнитной силовой линии в ярме [1, с. 27, формула 1.69]:

$$L_j = \frac{\pi \cdot (D_B + h_j)}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot (15,4 + 6,75)}{2 \cdot 1} = 34,8 \text{ мм}, \quad (2.74)$$

где высота спинки ротора [1, с. 27, формула 1.70]:

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = \frac{43,5 - 15,4}{2} - 7,3 = 6,75 \text{ мм}. \quad (2.75)$$

2.4.12 Суммарное магнитное напряжение магнитной цепи (на пару полюсов) [1, с. 28, формула 1.72]:

$$F_{ц} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j \quad (2.76)$$

$$F_{ц} = 263,3 + 29,58 + 21,74 + 93,29 + 7,4 = 415,3 \text{ А}.$$

2.4.13 Коэффициент насыщения магнитной цепи [1, с. 28, формула 1.73]:

$$k_{\mu} = \frac{F_{ц}}{F_{\delta}} = \frac{415,3}{263,3} = 1,58 \quad (2.77)$$

2.4.14 Намагничивающий ток [1, с. 28, формула 1.74]:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{ц}}{0,9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot k_{061}} = \frac{1 \cdot 415,3}{0,9 \cdot 3 \cdot 945 \cdot 0,96} = 0,17 \text{ А} \quad (2.78)$$

2.4.15 Относительное значение намагничивающего тока [1, с.28, формула 1.75]:

$$I_{\mu*} = \frac{I_{\mu}}{I_{1ном}} = \frac{0,17}{0,28} = 0,61 \quad (2.79)$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны $k_Z = 1,2$ находится в рекомендуемых пределах $1,6...1,7 > k_Z > 1,1$, что определяет правильность выбранных размерных соотношений и обмоточных данных проектируемой машины.

Значение намагничивающего тока $I_{\mu*} = 0,61$ находится в допустимых пределах $0,5 \dots 0,9$ [1, с. 27 - 28].

2.5 Параметры рабочего режима

Параметрами АД являются активные и индуктивные сопротивления обмоток статора r_1 , x_1 , ротора r_2 , x_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление r_{12} , учитывающее потери в стали. Физические процессы в АД наглядно отражает схема замещения рисунок 2.5.

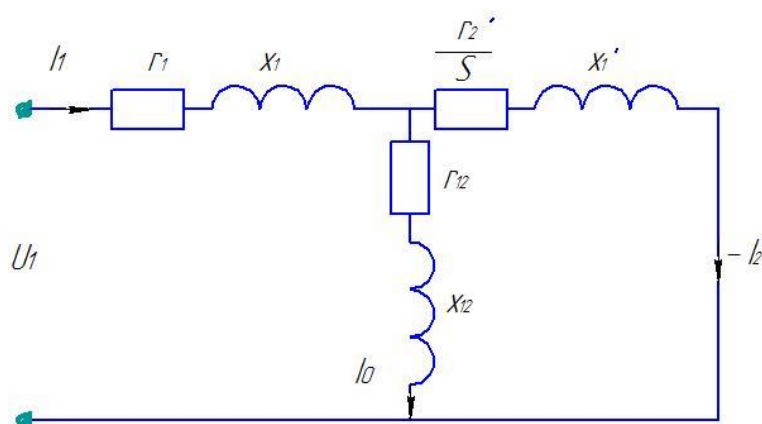


Рисунок 2.5. Схема замещения для номинального режима.

Параметры схемы замещения зависят от режима работы АД. С увеличением нагрузки увеличивается поток рассеяния и в связи с насыщением отдельных участков магнитопровода полями рассеяния индуктивные сопротивления x_1 и x_2 уменьшаются, при увеличении K_E уменьшается степень насыщения магнитной цепи по пути основного потока, увеличивается x_{12} . Изменение скольжения вызывает изменение r_2 и x_2 , обусловленное поверхностным эффектом. Учитывая это, возьмем исходные параметры в номинальном рабочем режиме.

2.5.1 Активное сопротивление фазы обмотки статора [1, с. 29, формула 1.76]:

$$r_1 = \rho_V \cdot \frac{L_1}{q_{эл}} = \frac{10^{-6}}{44} \cdot \frac{297}{6,36 \cdot 10^{-8}} = 109,59 \text{ Ом}, \quad (2.80)$$

где $q_{эл}$ - площадь поперечного сечения элементарного проводника;

ρ_V - удельное сопротивление материала обмотки при расчетной

температуре, Ом·м (для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура $t_{расч} = 115^\circ\text{C}$; для медных проводников $\rho_V = \rho_{115} = \frac{10^{-6}}{44}$ Ом·м) [1, с. 60].

2.5.2 Длина эффективных проводников фазы обмотки [1, с. 30, формула 1.76]:

$$L_1 = l_{ср1} \cdot W_1 = 0,3143 \cdot 945 = 297 \text{ м}, \quad (2.81)$$

где $l_{ср1}$ - средняя длина витка обмотки [1, с. 30, формула 1.78]:

$$l_{ср1} = 2 \cdot (l_{п1} + l_{л1}) = 2 \cdot (37 + 120,2) = 314,3 \text{ мм} \quad (2.82)$$

2.5.3 Длина пазовой части равна конструктивной длине сердечников машины [1, с. 30, формула 1.79]:

$$l_{п1} = l_1 = 37 \text{ мм}$$

Лобовая часть катушек имеет сложную конфигурацию. Достаточно точные результаты расчётов дают эмпирические формулы, учитывающие основные особенности конструктивных форм катушек.

2.5.4 Длина лобовой части [1, с. 30, формула 1.80]:

$$l_{л1} = k_{л} \cdot b_{кт} + 2B = 1,2 \cdot 83,5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,01 = 120,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.83)$$

где длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части $B = 0,01 \text{ м}$;

коэффициенты $k_{л} = 1,2$; $k_{выл} = 0,26$ при $2p = 2$ [1, с. 30, таблица 1.9];

$\beta_1 = 1$ укорочение шага обмотки статора.

2.5.5 Длина вылета лобовой части катушки [1, с. 30, формула 1.81]:

$$l_{выл} = k_{выл} \cdot b_{кт} + B = 0,26 \cdot 83,5 \cdot 10^{-3} + 0,01 = 31,7 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (2.84)$$

где $b_{кт}$ — средняя ширина катушки, определяемая по дуге окружности, проходящей по серединам высоты пазов [1, с. 30, формула 1.82]:

$$b_{кт} = \frac{\pi \cdot (D + h_{п1}) \cdot \beta_1}{2 \cdot p} = \frac{3,14 \cdot (44 + 9,4)}{2 \cdot 1} = 83,5 \text{ мм} \quad (2.85)$$

2.5.6 Длина пазовой части

$$l_{п1} = l_{\delta} = 37 \text{ мм}$$

2.5.7 Относительное значение r_1

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 109,59 \cdot \frac{0,28}{220} = 0,14 \quad (0,06 \dots 0,16) \quad (2.86)$$

За фазу обмотки, выполненной в виде беличьей клетки, принимают один стержень и два участка замыкающих колец.

2.5.8 Активное сопротивление фазы алюминиевой обмотки ротора [1, с. 31, формулы 1.83, 1.84]:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 76,677 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 5,28 \cdot 10^{-6}}{0,4158^2} = 137,78 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (2.87)$$

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_c \cdot K_r}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,037}{23,347 \cdot 10^{-6}} = 76,677 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (2.88)$$

где l_c - длина стержня (расстояние между замыкающими кольцами),

$K_r = 1$ - коэффициент увеличения активного сопротивления стержня от действия эффекта вытеснения тока в номинальном режиме,

ρ_c и $\rho_{кл}$ - удельные сопротивления стержня и замыкающих колец,

$$\rho_{115} = \frac{10^{-6}}{20,5} \text{ Ом} \cdot \text{м}; \quad l_1 = l_c = 0,037 \text{ м},$$

2.5.9 Активное сопротивление замыкающих колец [1, с. 31, формула 1.85]:

$$r_{кл} = \rho_{кл} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{3,14 \cdot 34,4 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 66,43 \cdot 10^{-6}} = 5,28 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (2.89)$$

где $D_{кл.ср} = 34,4 \text{ мм}$ - средний диаметр п.п. 2.3.21 расчета.

2.5.10 Приводим r_2 к числу витков обмотки статора [1, с. 31, формула 1.88]:

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 137,78 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (945 \cdot 0,96)^2}{15} = 90,716 \text{ Ом} \quad (2.90)$$

2.5.11 Относительное значение:

$$r'_{2*} = r_2 \cdot \frac{I_{1ном}}{u_{1ном}} = 90,716 \cdot \frac{0,28}{220} = 0,116 \text{ Ом} \quad (0,06 \dots 0,16) \quad (2.91)$$

2.5.12 Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором [1, с. 31, формула 1.89]:

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{w}{100}\right)^2 \cdot \frac{i_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_\pi + \lambda_\lambda + \lambda_d), \quad (2.92)$$

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{945}{100}\right)^2 \cdot \frac{37 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 3} \cdot (1,2966 + 2,09 + 2,778) = 53,67 \text{ Ом},$$

2.5.13 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеивания статора [1, с. 32, формула 1.90]:

$$\lambda_\pi = \frac{h_{12}}{3 \cdot d_1} \cdot K_\beta + \left(0,785 - \frac{b_{ш}}{2 \cdot b_2} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}}\right) \cdot K'_\beta; \quad (2.93)$$

$$\lambda_{\Pi} = \frac{5,9}{3 \cdot 6,1} \cdot 1 + \left(0,785 - \frac{1,7}{2 \cdot 8,1} + \frac{0,5}{1,7}\right) \cdot 1 = 1,2966,$$

где $h_{12} = 5,9 \text{ мм}$, $d_1 = 6,1 \text{ мм}$,

$K_{\beta} = K'_{\beta} = 1$ - коэффициенты, учитывающие укорочение шага обмотки при диаметральном шаге для однослойных обмоток.

2.5.14 Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, с. 32, формула 1.94]:

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_{\delta}} (l_{л1} - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau); \quad (2.94)$$

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{3}{37 \cdot 10^{-3}} (0,1202 - 0,64 \cdot 69,1 \cdot 10^{-3}) = 2,0933,$$

где q и $l_{л1}$ - число пазов на полюс и фазу и длина лобовой части витка обмотки;

$\beta = y_{\text{расч}} / \tau$ - относительное укорочение шага обмотки,

где $\beta = 1$; $\tau = 0,0691$; $q = 3$, $l_{л1} = 0,1202 \text{ м}$.

2.5.15 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1, с. 32 - 33, формулы 1.95, 1.96]:

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{7,7 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0191} \cdot 1,1059 = 2,778, \quad (2.95)$$

$$\text{где } \xi = 2 \cdot k'_{\text{ск}} \cdot k_{\beta} - k_{061}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}}\right)^2 \cdot (1 + \beta_{\text{ск}}^2); \quad (2.96)$$

$$\xi = 2 \cdot 1,2 \cdot 1 - 0,96^2 \cdot (1,198)^2 \cdot (1 + 0^2) = 1,1059,$$

где $\frac{t_{z2}}{t_{z1}} = 1,198$ - зубцовые деления статора и ротора,

$k_{\beta} = 1$; при отсутствии скоса пазов $b_{\text{ск}} = 0$, $\beta_{\text{ск}} = 0$; $k'_{\text{ск}} = 1,2$ [1, с. 33, рисунок 1.11].

2.5.16 Относительное значение:

$$X_{1*} = X_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 53,67 \cdot \frac{0,28}{220} = 0,0683 \quad (2.97)$$

2.5.17 Индуктивное сопротивление обмотки ротора [1, с. 33, формула 1.98]:

$$X_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}) \cdot 10^{-6}, \quad (2.98)$$

$$X_2 = 7,9 \cdot 50 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot (1,29 + 0,69 + 2,83) \cdot 10^{-6} = 71,17 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

2.5.18 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния [1, с. 34, формула 1.99]:

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_{п2}}{3 \cdot d_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot d_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{2 \cdot d_1} \right] \cdot K_q + \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}}, \quad (2.99)$$

(для рабочего режима $K_q=1$)

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{7,3}{3 \cdot 4,5} \cdot \left(1 - \frac{3,14 \cdot 4,5^2}{8 \cdot 23,35} \right)^2 + 0,66 - \frac{1}{2 \cdot 4,5} \right] \cdot K_q + \frac{0,5}{1} = 1,286$$

2.5.19 Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, с. 34, формула 1.102]:

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.ср.}}{Z_2 \cdot i_\delta \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{кл.ср.}}{h_{кл} + 2 \cdot b_{кл}} = \frac{2,3 \cdot 34,4 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4158^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 34,4 \cdot 10^{-3}}{9,1 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 7,3 \cdot 10^{-3}}; \quad (2.100)$$

$$\lambda_{л2} = 0,6875$$

2.5.20 Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1, с. 34, формула 1.101]:

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{Z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{9,1 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1,0191} \cdot 0,95 = 2,8277, \quad (2.101)$$

где $\xi = 0,9 - 1,0$, принимаем $\xi = 0,95$.

2.5.21 Приводим X_2 к числу витков статора [1, с. 34, формула 1.103]:

$$X'_2 = X_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (W_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2} = 71,01 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (945 \cdot 0,96)^2}{15} = 46,2 \text{ Ом} \quad (2.102)$$

2.5.22 Относительное значение:

$$X'_{2*} = X'_2 \cdot \frac{I_{1 \text{ ном}}}{U_{1 \text{ ном}}} = 46,2 \cdot \frac{0,28}{220} = 0,0588 \quad (2.103)$$

Представление параметров асинхронного двигателя в относительные значения делается для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчёта характеристик.

Полученные относительные значения активных сопротивлений обмотки статора $r_{1*} = 0,1497$ и приведённого сопротивления обмотки ротора $r'_{2*} = 0,116$ близки друг к другу, и обычно для машин малой мощности составляют $r_{1*} = r'_{2*} = 0,06 \dots 0,16$ [1, с. 35], относительные значения индуктивных сопротивлений рассеяния обмотки статора и приведённого сопротивления обмотки ротора: $x_1^* = 0,0683 \approx 0,07$, $x_2^* = 0,0588 \approx 0,06$.

Полученные относительные значения параметров обмотки статора и ротора проектируемого двигателя находятся в рекомендуемых пределах, расчеты оставляем без изменений.

2.6 Расчет потерь

При работе асинхронного двигателя часть подводимой мощности расходуется на нагрев проводников, перемагничивание сердечника, создание необходимого для охлаждения потока воздуха, трение вращающихся частей о воздух, трение в подшипниках и т.д. Эту часть мощности называют потерями, так как она как бы «теряется» при электромеханическом преобразовании энергии.

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

Основные потери в стали АД рассчитываются только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = f_1 \cdot S$, в режимах, близких к номинальному, очень мала, и потери в стали ротора незначительны.

В пусковых режимах потери в стали ротора становятся соизмеримыми с аналогичными потерями в статоре, однако преобладающими в этом режиме являются электрические потери, поэтому пренебрежение потерями в стали ротора и при больших скольжениях не вносит заметной погрешности в расчет.

2.6.1 Основные потери в стали [1, с. 37, формула 1.109]:

$$P_{\text{ст.осн}} = \rho_{1/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^{\beta} \cdot (k_{\text{да}} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\text{дз}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}); \quad (2.104)$$

$$P_{\text{ст.осн}} = 2,5 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot (1,6 \cdot 1,62^2 \cdot 0,5754 + 1,7 \cdot 1,84^2 \cdot 0,1213) = 6,07 \text{ Вт},$$

где $\rho_{1/50} = 2,5 \text{ Вт/кг}$ - удельные потери,

$\beta = 1,5$ показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания для стали 2013,

$k_{\text{да}}$ и $k_{\text{дз}}$ - коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения магнитного потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов, согласно рекомендациям [1]:

$$k_{\text{да}} = 1,6, \quad k_{\text{дз}} = 1,7,$$

B_a и B_z - индукция в ярме и средняя индукция в зубцах статора,

m_A и m_{z1} - масса стали ярма и зубцов статора.

2.6.2 Масса стали ярма [1, с. 37, формула 1.110]:

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{ст1} \cdot k_{c1} \cdot \gamma_c, \quad (2.105)$$

$$m_a = 3,14 \cdot (81 \cdot 10^{-3} - 9,1 \cdot 10^{-3}) \cdot 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7800 = 0,5754 \text{ кг}$$

2.6.2 Масса зубцов статора [1, с. 37, формула 1.111]:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1cp} \cdot Z_1 \cdot l_{ст1} \cdot k_{c1} \cdot \gamma_c, \quad (2.106)$$

$$m_{z1} = 9,4 \cdot 10^{-3} \cdot 2,8 \cdot 10^{-3} \cdot 18 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 7800 = 0,1213 \text{ кг},$$

где $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ - удельная масса стали.

Добавочные потери в стали, возникающие при холостом ходе, подразделяются на поверхностные и пульсационные.

Они зависят от отношения ширины шлица пазов к величине воздушного зазора, числа пазов, зубцового шага, амплитуды пульсации индукции в воздушном зазоре и зубцах, а также массы элементов сердечника.

В связи с тем, что в микродвигателях применяют только полузакрытые пазы, относительно большой воздушный зазор и малое число пазов добавочные потери в стали на порядок меньше по сравнению с основными потерями в стали и без большой погрешности их принимают как $0,1 \cdot P_{ст.осн.}$ ($P_{пов1}$ и $P_{пул1} \approx 0$, т. к. в полузакрытых пазах таких роторов ширина шлица $b_{ш2}$ так мала, что пульсации индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов сердечника статора незначительны, поэтому расчет этих потерь не проводят).

2.6.3 Сумма добавочных потерь в стали:

$$P_{ст.доб} = 0,1 \cdot P_{ст.осн} = 0,1 \cdot 6,192 = 0,607 \text{ Вт} \quad (2.107)$$

2.6.4 Полные потери в стали:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 6,07 + 0,607 = 6,678 \text{ Вт} \quad (2.108)$$

2.6.5 Электрические потери в фазах обмотки статора [1, с. 38, формула 1.112]:

$$P_{э1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 0,28^2 \cdot 109,59 = 25,78 \text{ Вт} \quad (2.109)$$

2.6.6 Электрические потери в фазах обмотки ротора [1, с. 38, формула 1.113]:

$$P_{э2} = m_1 \cdot I_2'^2 \cdot r_2 = 3 \cdot 0,2268^2 \cdot 1,38 \cdot 10^{-4} = 14 \text{ Вт}, \quad (2.110)$$

где $I_2' = 1,08 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi = 0,2268 \text{ А}$.

2.6.7. Механические и вентиляционные потери для машин с внешним обдувом [1, с. 38, формула 1.115]:

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 = 1 \cdot \left(\frac{3000}{10}\right)^2 \cdot (81 \cdot 10^{-3})^4 = 3,87 \text{ Вт} \quad (2.111)$$

(для $2\rho = 2$ коэффициент $K_T = 1$)

Добавочные потери при нагрузке возникают за счет действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости распределения МДС обмоток, в короткозамкнутых роторах, где кроме того, возникают потери от поперечных токов, замыкающихся через листы сердечника между стержнями. ГОСТ устанавливает средние расчётные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5% номинальной мощности.

2.6.8 Добавочные потери при номинальном режиме [1, с. 39, формула 1.117]:

$$P_{\text{доб.ном.}} = 0,005 \cdot P_{2\text{н}} = 0,005 \cdot 90 = 0,45 \text{ Вт} \quad (2.112)$$

2.6.9 Сумма всех потерь в двигателе в номинальном режиме:

$$\Sigma P = P_{\text{ст}} + P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб.ном.}}; \quad (2.113)$$

$$\Sigma P = 6,678 + 25,78 + 14 + 3,87 + 0,45 = 50,78 \text{ Вт}$$

2.6.10 Ток холостого хода двигателя:

$$I_{\text{х.х.}} \approx I_{\mu} = 0,17 \text{ А}$$

2.7 Расчет рабочих характеристик

Рабочими характеристиками АД называют зависимости P_1 , I_1 , $\cos\varphi$, η , $s = f(P_2)$ для диапазона изменения $P_2 = 0 \div 1,2P_{2\text{ном}}$ при $U_1 = U_{1\text{н}}$, $f_1 = f_{1\text{н}}$.

Активные и индуктивные сопротивления схемы замещения являются параметрами машины.

2.7.1 Определим величину последовательно включенных сопротивлений.

2.7.1.1 Сопротивление r_{12} [1, с. 34, формула 1.104]:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.осн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{6,07}{3 \cdot 0,17^2} = 70,39 \text{ Ом} \quad (2.114)$$

2.7.1.2 Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора x_{12} [1, с. 35, формула 1.105]:

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{ном}}}{I_\mu} - x_1 = \frac{220}{0,17} - 0,0683 = 1,244 \cdot 10^3 \text{ Ом} \quad (2.115)$$

Исходные данные для расчета рабочих характеристик АД:

$$\begin{aligned} X_1 &= 53,67 \text{ Ом}, & x_{12} &= 1,244 \cdot 10^3 \text{ Ом}, & U_{1н} &= 220 \text{ В}, \\ r_1 &= 109,59 \text{ Ом}, & r_{12} &= 70,39 \text{ Ом}, & p &= 1, \\ r_2' &= 90,716 \text{ Ом}, & X_2' &= 46,2 \text{ Ом}, & f_1 &= 50 \text{ Гц}, \\ W_1 &= 315, & h_{п2} &= 7,3 \text{ мм}, & k_{\text{одл}} &= 0,96, \\ \mu_R &= 1, & k_\mu &= 1,58, & \rho_{115} &= \frac{10^{-6}}{44} \text{ Ом} \cdot \text{м}, \\ \tau &= 69,1 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Коэффициент c_1 представляет собой взятое с обратным знаком отношение вектора напряжения фазы $U_{1н}$ к вектору ЭДС E_1 , при синхронном вращении машины с учётом сдвига фаз этих векторов.

2.7.2 Коэффициент c_1

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1r}^2} = \sqrt{1,048^2 + 0,0903^2} = 1,052 \quad (2.116)$$

Используем более точный расчет, так как $\gamma > 1^\circ$

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}; \quad (2.117)$$

$$\gamma = \arctg \frac{109,59 \cdot 1,244 \cdot 10^3 - 70,39 \cdot 53,67}{70,39 \cdot (109,59 + 70,39) + 1,244 \cdot 10^3 \cdot (53,67 + 1,244 \cdot 10^3)} = 4,67^\circ$$

2.7.3 Активная составляющая коэффициента c_1

$$c_{1a} = \frac{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2}; \quad (2.118)$$

$$c_{1a} = \frac{70,39 \cdot (109,59 + 7,39) + 1,244 \cdot 10^3 \cdot (53,67 + 1,244 \cdot 10^3)}{70,39^2 + (1,244 \cdot 10^3)^2} = 1,048$$

2.7.4 Реактивная составляющая коэффициента c_1

$$c_{1r} = \frac{x_1 \cdot r_{12} + r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{53,67 \cdot 70,39 + 109,59 \cdot 1,244 \cdot 10^3}{70,39^2 + (1,244 \cdot 10^3)^2} = 0,0903 \quad (2.119)$$

2.7.5 Активная составляющая тока синхронного холостого хода

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_{1н}} = \frac{6,07 + 3 \cdot 0,17^2 \cdot 109,59}{3 \cdot 220} = 0,0236 \text{ А} \quad (2.120)$$

2.7.6 Реактивная составляющая тока синхронного холостого хода

$$I_{0p} = I_{\mu} = 0,17 \text{ A}$$

2.7.7 Вспомогательные коэффициенты

$$\dot{a} = c_1^2 = 1,052^2 = 1,1064; \quad \dot{b} = 0;$$

$$a = c_1 \cdot r_1 = 1,052 \cdot 109,59 = 115,28 \text{ Ом} \quad (2.121)$$

$$b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x_2) = 1,052 \cdot (53,67 + 1,052 \cdot 46,2) = 107,56 \text{ Ом.} \quad (2.122)$$

2.7.8 Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 6,678 + 3,87 = 10,55 \text{ Вт.} \quad (2.121)$$

2.7.9 Расчёт рабочих характеристик проводим аналитическим методом.

Рассчитаем рабочие характеристики для скольжений в диапазоне $s \approx (0,004 - 0,12) \cdot s_{\text{ном}}$:

$$s = 0,004; 0,01; 0,02; 0,04; 0,06; 0,08; 0,09; 0,094; 0,12,$$

номинальное скольжение предварительно принимаем равным $S_n \approx r_2^{*'} = 0,1155$.

Проведем расчет по формулам:

$$\text{- активное сопротивление:} \quad R_i = \dot{a} \cdot \frac{r_2}{s_i} + a; \quad (2.122)$$

$$\text{- реактивное сопротивление:} \quad X_i = b; \quad (2.123)$$

$$\text{- общее сопротивление:} \quad Z_i = \sqrt{X_i^2 + R_i^2}; \quad (2.124)$$

$$\text{- коэффициент активной составляющей:} \quad \cos \varphi'_i = \frac{R_i}{Z_i}; \quad (2.125)$$

$$\text{- коэффициент реактивной составляющей:} \quad \sin \varphi'_i = \frac{X_i}{Z_i}; \quad (2.126)$$

- приведенное к статору значение фазного тока ротора:

$$I''_{2i} = \frac{U_{1н}}{Z_i}, \quad (2.127)$$

- активная составляющая фазного тока статора:

$$I_{1a_i} = I_{0a} + I''_{2i} \cdot \cos \varphi'_i, \quad (2.128)$$

- реактивная составляющая фазного тока статора:

$$I_{1p_i} = I_{0p} + I''_{2i} \cdot \sin \varphi'_i, \quad (2.129)$$

- фазный ток статора:

$$I_{1i} = \sqrt{I_{1ai}^2 + I_{1pi}^2}, \quad (2.130)$$

- приведенное к статору значение фазного тока ротора:

$$I'_{2i} = c_1 \cdot I''_{2i}, \quad (2.131)$$

- активная мощность на выходе асинхронного двигателя:

$$P_{1i} = 3 \cdot U_{1н} \cdot I_{1ai}, \quad (2.132)$$

- электрические потери в обмотках статора:

$$P_{\varepsilon 1 i} = 3 \cdot (I_{1i})^2 \cdot r_1, \quad (2.133)$$

- электрические потери в обмотках ротора:

$$P_{\varepsilon 2 i} = 3 \cdot (I'_{2i})^2 \cdot r'_2, \quad (2.134)$$

- активная мощность на входе асинхронного двигателя:

$$P_{\text{доб}i} = P_{\text{доб.н}} \cdot \left(\frac{I_{1i}}{I_{1ном}} \right)^2, \quad (2.135)$$

- суммарные потери:

$$\Sigma P_i = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\varepsilon 1 i} + P_{\varepsilon 2 i} + P_{\text{доб}i}; \quad (2.136)$$

$$P_{2i} = P_{1i} - \Sigma P_i; \quad (2.137)$$

$$\text{- КПД: } \eta_i = 1 - \frac{\Sigma P_i}{P_{1i}}; \quad (2.138)$$

$$\text{- коэффициент мощности: } \cos \varphi_i = \frac{I_{1ai}}{I_{1i}}; \quad (2.139)$$

- синхронная частота вращения, вращения ротора:

$$n_{2i} = n \cdot (1 - s_i); \quad (2.140)$$

- момент на валу двигателя:

$$M_i = 60 \cdot \frac{P_2}{2 \cdot \pi \cdot n_{2i}} \quad (2.141)$$

Исходные данные для расчета характеристик:

$P_{2ном} = 90 \text{ Вт};$	$U_{1н} = 220 \text{ В};$	$2 \cdot \rho = 2;$
$I_{0a} = 0,0236 \text{ А};$	$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 10,55 \text{ Вт};$	$r_1 = 109,59 \text{ Ом};$
$I_{0p} = I_{\mu} = 0,17 \text{ А};$	$c_1 = 1,052;$	$r'_2 = 90,7 \text{ Ом};$
$a' = 1,106;$	$b' = 0;$	$b = 107,56 \text{ Ом};$
		$a = 115,28 \text{ Ом}.$

Результаты расчёта сведены в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 Данные для построения рабочих характеристик

№ п/п	Характер истика	Размер ность	Скольжение S , о.е.								
			$S_{xx}=$ 0,004	0,01	0,02	0,04	0,06	0,08	0,09	$S_{\pi}=$ 0,094	0,12
1.	R	$Ом$	25207	10152	51337	26245	17881	13699	12305	11830	951,68
2.	X	$Ом$	107,6	107,56	107,56	107,56	107,56	107,56	107,56	107,56	107,56
3.	Z	$Ом$	25208	10153	51308	26267	17913	13741	12352	11879	957,7
4.	I_1''	A	0,009	0,22	0,043	0,054	0,123	0,16	0,178	0,1852	0,23
5.	$\cos \varphi_2'$	$о.е.$	1,0	0,999	0,9999	0,9992	0,9982	0,9969	0,9962	0,9959	0,9937
6.	$\sin \varphi_2'$	$о.е.$	0,004	0,0106	0,0209	0,041	0,06	0,0783	0,0871	0,09	0,112
7.	I_{1a}	A	0,032	0,0453	0,0664	0,1073	0,1462	0,1832	0,2	0,208	0,2518
8.	I_{1p}	A	0,17	0,1702	0,1709	0,1734	0,1774	0,1825	0,1855	0,1868	0,196
9.	I_1	A	0,173	0,176	0,183	0,204	0,23	0,259	0,2735	0,28	0,319
10.	I_2'	A	0,009	0,0228	0,0451	0,088	0,129	0,168	0,187	0,1948	0,2416
11.	P_1	$Вт$	21,33	29,87	43,84	70,8	96,48	120,92	132,68	137,3	166,2
12.	$P_{\Sigma 1}$	$Вт$	9,85	10,2	11,05	13,67	17,37	21,99	24,6	25,698	33,46
13.	$P_{\Sigma 2}$	$Вт$	0,023	0,1414	0,553	2,112	4,54	7,72	9,55	10,328	15,89
14.	$P_{доб}$	$Вт$	0,172	0,178	0,193	0,24	0,304	0,385	0,43	0,4495	0,585
15.	ΣP	$Вт$	20,6	21,073	22,35	26,58	32,77	40,65	45,14	47,027	60,48
16.	P_2	$Вт$	0,736	8,8	21,49	44,23	63,72	80,27	87,54	90,275	105,74
17.	η	$о.е.$	0,035	0,2949	0,49	0,625	0,66	0,664	0,6598	0,6575	0,6361
18.	$\cos \varphi$	$о.е.$	0,187	0,257	0,362	0,526	0,636	0,708	0,735	0,744	0,79
19.	n	$об/мин$	2988	2970	2940	2880	2820	2760	2730	2718	2640
20.	M	$H \cdot м$	0,002	0,0283	0,0698	0,1466	0,2158	0,2777	0,3062	0,3172	0,3825

2.7.10 Рабочие характеристики представлены на рисунке 2.6.

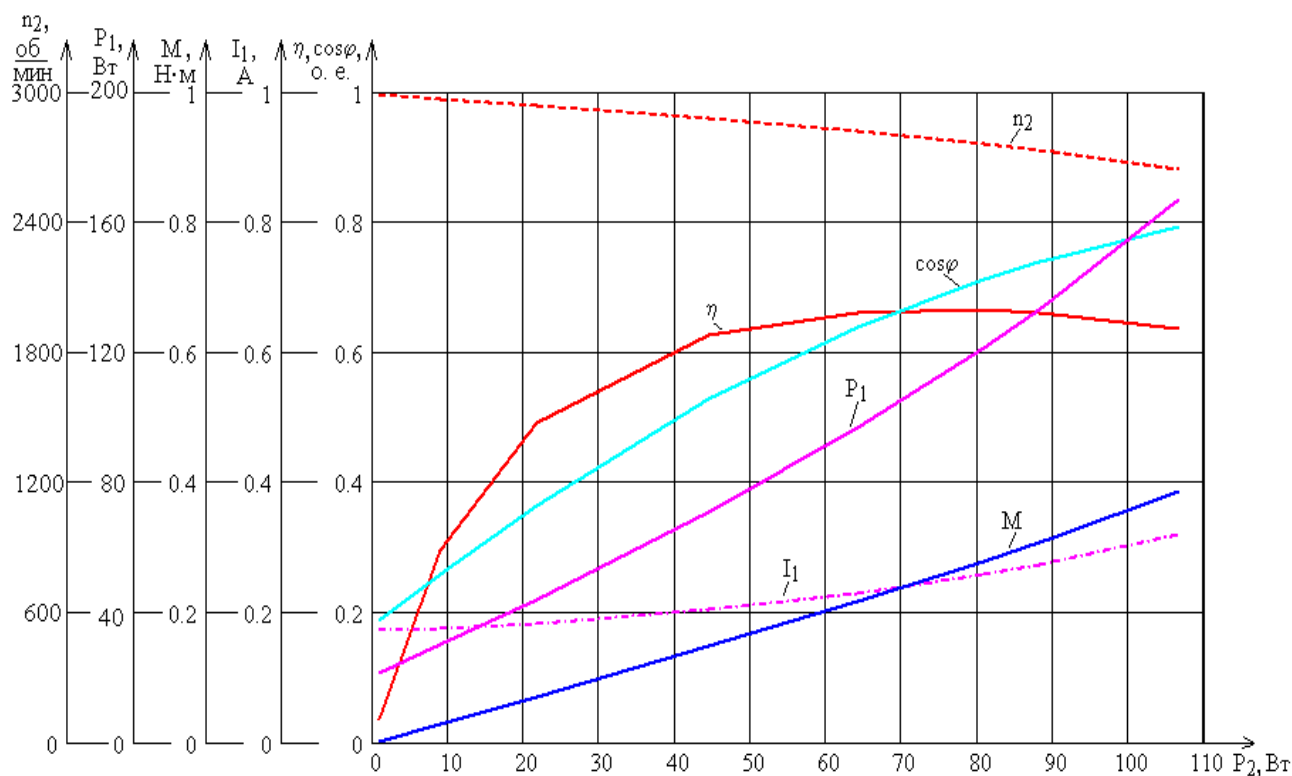


Рисунок 2.6. Рабочие характеристики АД

2.7.11 После построения графиков уточняем значение номинального скольжения: $S_n = 0,094$.

2.7.12 Номинальные данные спроектированного двигателя:

$$\begin{array}{lll}
 P_{2\text{НОМ}} = 90 \text{ Вт}; & U_{1\text{НОМ}} = 220 \text{ В}; & I_{1\text{НОМ}} = 0,28 \text{ А}; \\
 P_1 = 137,3 \text{ Вт}; & \cos \varphi_{\text{НОМ}} = 0,74; & \eta_{\text{НОМ}} = 0,66; \\
 M_{\text{НОМ}} = 0,317 \text{ Н} \cdot \text{м}; & n_{\text{НОМ}} = 2718 \text{ об/мин}; & S_n = 0,094.
 \end{array}$$

2.8 Расчет пусковых характеристик

Пусковыми характеристиками асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором называют зависимости $M^* = f(s)$ и $I^* = f(s)$ для диапазона изменения скольжения, соответствующего двигательному режиму работы машины, при $U_1 = U_{1\text{н}}$, $f_1 = f_{1\text{н}}$.

При расчете пусковых характеристик учитывают изменения параметров схемы замещения двигателя, вызванные эффектом вытеснения тока в стержнях

обмотки ротора и насыщением зубцовых зон магнитной цепи от полей рассеяния.

2.8.1 Рассчитаем пусковые характеристики для скольжений в диапазоне $s=(1-0,01)$:

$$s = 1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,3; 0,2; 0,1; 0,01.$$

Принимаем $k_{нас} = 1,24; 1,2; 1,18; 1,14; 1,12; 1,1; 1,08; 1,05$.

Проведем расчет по формулам:

- ток ротора без учета влияния насыщения:

$$I'_{2i} = \frac{U_{1H}}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s_i}\right)^2 + (x_1 + x'_2)^2}}; \quad (2.142)$$

$$k_i = I'_{2i} \cdot k_{Hi}; \quad (2.143)$$

- средняя МДС обмотки, отнесенная к одному пазу обмотки статора:

$$F_{п.спi} = 0,7 \cdot \frac{I'_{2i} \cdot k_{Hi} \cdot u_{п1}}{a} \cdot \left(k'_\beta + k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2}\right); \quad (2.144)$$

- фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре:

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{7,7 \cdot 10^{-3} + 9,1 \cdot 10^{-3}}} = 0,67; \quad (2.145)$$

$$B_{\Phi \delta i} = \frac{F_{п.спi} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N}; \quad (2.146)$$

- коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$c_{1i} = (t_{Z1} - b_{ш1}) \cdot (1 - k_{\delta i}); \quad (2.147)$$

- уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния паза обмотки статора:

$$\Delta \lambda_{сп1наi} = \frac{h_{ш1} + 0,58 \cdot h_k}{b_{ш1}} \cdot \frac{c_{1i}}{c_{1i} + 1,5 \cdot b_{ш1}}; \quad (2.148)$$

$$\left[h_k = \frac{d_1 - b_{ш}}{2} = \frac{6,1 - 1,7}{2} = 2,2 \text{ мм} \right]; \quad (2.149)$$

$$\lambda_{п1насi} = \lambda_{п1} - \Delta \lambda_{сп1наi}; \quad (2.150)$$

- коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$\lambda_{д1нас_i} = \lambda_{д1} \cdot k_{\delta_i}; \quad (2.151)$$

- индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения: $x_{1нас_i} = x_1 \cdot \frac{\Sigma \lambda_{1нас_i}}{\Sigma \lambda_1};$ (2.152)

- коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока:

$$c_{2_i} = (t_{z2} - b_{ш2}) \cdot (1 - k_{\delta_i}); \quad (2.153)$$

$$h_{ш2} = 0,5 \text{ мм},$$

$$\Delta \lambda_{п2нас_i} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{c_{2_i}}{c_{2_i} + b_{ш2}}; \quad (2.154)$$

- коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения: $\lambda_{д2нас_i} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta_i};$ (2.155)

- приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока насыщения:

$$\dot{x}_{2нас_i} = \dot{x}_2 \cdot \frac{\Sigma \lambda_{2нас_i}}{\Sigma \lambda_2}; \quad (2.156)$$

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 1,58 \cdot 1,244 \cdot 10^3 = 1961,9; \quad (2.157)$$

$$c_{1п.нас_i} = 1 + \frac{x_{1нас_i}}{x_{12п}}; \quad (2.158)$$

- ТОКИ И МОМЕНТЫ:

$$R_{п.нас_i} = r_1 + c_{1п.нас_i} \cdot \frac{\dot{r}_2}{s_i}; \quad (2.159)$$

$$X_{п.нас_i} = x_{1нас_i} + c_{1п.нас_i} \cdot \dot{x}_{2нас_i}; \quad (2.160)$$

$$\dot{I}_{2нас_i} = \frac{U_{1н}}{\sqrt{R_{п.нас_i}^2 + X_{п.нас_i}^2}}; \quad (2.161)$$

$$I_{1нас_i} = \dot{I}_{2нас_i} \cdot \frac{\sqrt{R_{п.нас_i}^2 + (X_{п.нас_i} + x_{12п})^2}}{c_{1п.нас_i} \cdot x_{12п}}; \quad (2.162)$$

- кратность пускового тока с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения: $I_{п*} = \frac{I_{1нас_i}}{I_{1ном}};$ (2.163)

- кратность пускового момента с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения:

$$M_{П*} = \left(\frac{I_{2насi}}{I_{2ном}} \right)^2 \cdot \frac{S_{ном}}{S_i} \quad (2.164)$$

Исходные данные:

$$\begin{aligned} P_{2ном} &= 90 \text{ Вт}; & U_{1н} &= 220 \text{ В}; & 2p &= 2; \\ I_{1н} &= 0,28 \text{ А}; & I_{2ном} &= 0,195 \text{ А}; & x_1 &= 53,67 \text{ Ом}; \\ x_2 &= 46,2 \text{ Ом}; & r_{12} &= 70,39 \text{ Ом} & r_1 &= 109,59 \text{ Ом}; \\ r_2 &= 90,7 \text{ Ом}; & c_{1п} &= 1,052; & S_{ном} &= 0,094; \\ C_N &= 0,67 & x_{12п} &= 66,695 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Данные расчета приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 Данные для построения пусковых характеристик

№ п/п	Характеристика	Размерность	Скольжение S, о.е.							
			1	0,8	0,6	0,4	0,3	0,2	0,1	0,01
1.	I_2'	A	0,983	0,9	0,788	0,627	0,519	0,385	0,215	0,024
2.	$k_{нас}$	-	1,24	1,2	1,18	1,14	1,12	1,1	1,08	1,05
3.	k	-	1,219	1,08	0,93	0,715	0,58	0,423	0,233	0,025
4.	$F_{п.ср}$	A	578,35	512,72	441,12	339,16	275,81	200,77	110,36	11,94
5.	$B_{Ф\delta}$	Tл	2,16	1,91	1,645	1,265	1,028	0,749	0,412	0,0445
6.	k_{δ}	-	0,86	0,89	0,91	0,93	0,95	0,97	0,98	0,99
7.	$c_1 \cdot 10^{-4}$	мм	8,4	6,6	5,4	4,2	3,0	1,8	1,2	0,06
8.	$\Delta\lambda_{сп1нас}$		0,2589	0,2148	0,1826	0,1477	0,11	0,0689	0,047	0,024
9.	$\lambda_{п1нас}$	-	1,0377	1,0818	1,114	1,1488	1,1866	1,2277	1,2496	1,2724
10.	$\lambda_{д1нас}$	-	2,389	2,4723	2,5279	2,5834	2,639	2,6945	2,7223	2,7501
11.	$x_{1нас}$	Ом	48,0295	49,138	49,9018	50,688	51,5	52,34	52,774	53,215
12.	c_2	мм	0,00113	0,0009	0,0007	0,00057	0,0004	0,00024	0,00016	0,00008
13.	$\Delta\lambda_{п2нас}$	-	0,266	0,236	0,211	0,181	0,144	0,098	0,0697	0,038
14.	$\lambda_{д2нас}$	-	2,432	2,517	2,573	2,63	2,686	2,743	2,77	2,799
15.	$x_{2нас}$	Ом	32,573	33,099	33,405	33,662	33,852	33,95	33,952	33,914
16.	$c_{1пнас}$	-	1,0245	1,025	1,0254	1,0258	1,0263	1,0267	1,0269	1,0271
17.	$R_{п.нас}$	Ом	202,53	225,83	264,634	342,24	419,92	575,276	1041,2	9427,3
18.	$X_{п.нас}$	Ом	81,4	83,07	84,16	85,22	86,24	87,2	87,64	88,05
19.	$I_{2нас}$	A	0,983	0,9004	0,788	0,627	0,519	0,385	0,215	0,024
20.	$I_{1нас}$	A	0,983	0,9	0,79	0,627	0,519	0,385	0,215	0,024
21.	I_{1*}	-	3,681	3,344	2,905	2,3	1,905	1,43	0,86	0,4
22.	M_*	-	2,516	2,5884	2,5913	2,41	2,175	1,77	1,098	0,135

2.8.2 Рабочие характеристики АД представлены на рисунке 2.7.

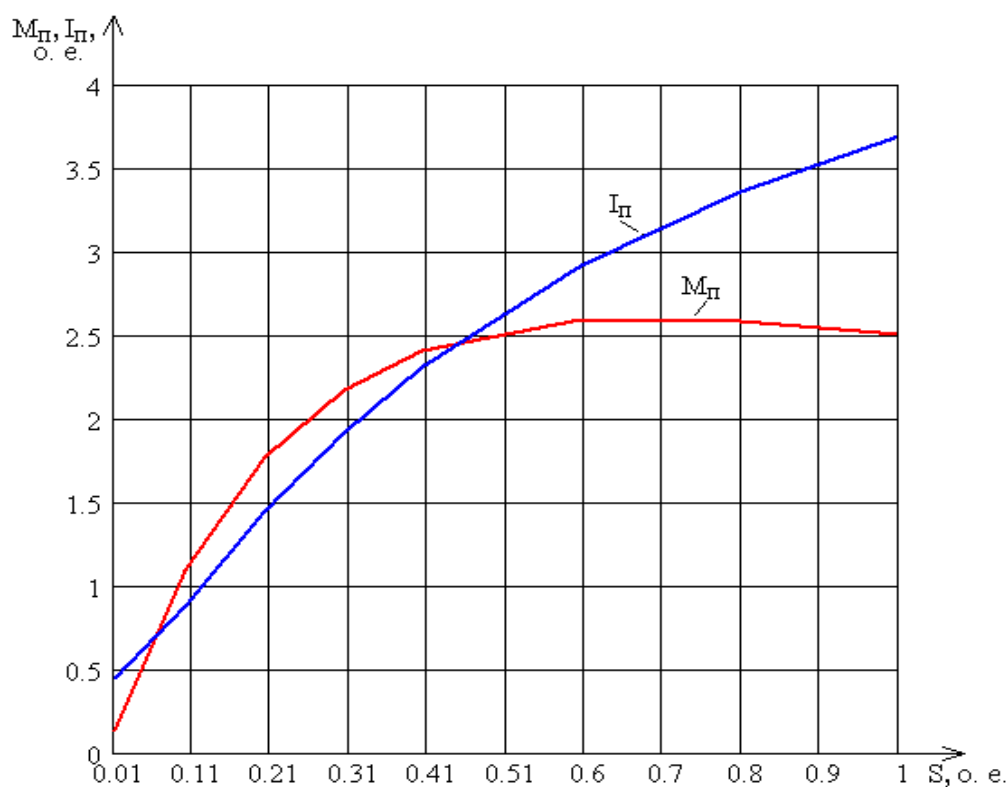


Рисунок 2.7. Пусковые характеристики АД

2.8.3 Номинальные и пусковые данные по рисункам 2.6, 2.7:

$$P_{2\text{ном}} = 90 \text{ Вт}; \quad U_{1\text{ном}} = 220 \text{ В}; \quad I_{1\text{ном}} = 0,28 \text{ А};$$

$$P_1 = 137,3 \text{ Вт}; \quad \cos \varphi_{\text{ном}} = 0,74; \quad \eta_{\text{ном}} = 0,66;$$

$$M_{\text{н}} = 1,09 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad n_{\text{ном}} = 2718 \text{ об/мин}; \quad S_{\text{н}} = 0,094.$$

$$M_{*\Pi} = 2,516 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{*\text{К}} = 2,59 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad I_{*\text{К}} = 2,9 \text{ А}$$

$$I_{*\Pi} = 3,68 \text{ А}; \quad I_{*\text{н}} = 0,79 \text{ А}.$$

2.8.4 Кратность пускового момента

$$m_{\Pi} = \frac{M_{*\Pi}}{M_{\text{н}}} = \frac{2,516}{1,09} = 2,31 \quad (2.165)$$

2.8.5 Кратность максимального момента

$$m_{\text{К}} = \frac{M_{*\text{К}}}{M_{\text{н}}} = \frac{2,59}{1,09} = 2,38 \quad (2.166)$$

2.8.6 Кратность пускового тока

$$i_{\Pi} = \frac{I_{*\Pi}}{I_{*\text{н}}} = \frac{3,68}{0,79} = 4,66 \quad (2.167)$$

2.8.7 Кратность тока

$$i_{\text{К}} = \frac{I_{*\text{К}}}{I_{*\text{н}}} = \frac{2,9}{0,79} = 3,67 \quad (2.168)$$

3. Тепловой и вентиляционный расчет

3.1 Тепловой расчет

Размеры и масса АД одной и той же мощности зависят от степени его защиты и способа и интенсивности охлаждения.

Тепловой режим в электрических машинах характеризуется величиной рабочих температур изоляции, смазки подшипников, материалов и покрытий. Особенно важна рабочая температура обмоток, от которой зависит долговечность и надежность двигателя. В АД промышленного назначения примерно 2/3 отказов связано с выходом из строя обмотки. Долговечность изоляции определяется рабочей температурой обмотки.

Оценку теплового режима двигателя дает приближенный расчет, где используются средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности двигателя и теплопроводности изоляции.

Электрические потери в обмотке статора разделяются на потери в пазовой части $P'_{\text{эл1}}$ и потери в лобовых частях катушек $P'_{\text{эл2}}$ [1, с. 46 - 47].

3.1.1 Потери в пазовой части [1, с. 47, формула 1.130]:

$$P'_{\text{эл1}} = K_p \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_1}{l_{\text{ср1}}} = 1,07 \cdot 25,7 \cdot \frac{2 \cdot 0,037}{0,3143} = 6,47 \text{ Вт}, \quad (3.1)$$

где из табл. 1 п. 119 расчета $P_{\text{эл}} = 25,7 \text{ Вт}$, K_p - коэффициент увеличения потерь в зависимости от класса нагревостойкости изоляции, учитывает возможность нагрева обмоток до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры [1, с. 47, таблица 1.11]. Для класса нагревостойкости изоляции F: $K_p = 1,07$.

3.1.2 Потери в лобовых частях катушек [1, с. 47, формула 1.131]:

$$P'_{\text{эл2}} = K_p \cdot P_{\text{эл}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{ср1}}} = 1,07 \cdot 25,7 \cdot \frac{2 \cdot 0,1202}{0,3143} = 21,02 \text{ Вт}. \quad (3.2)$$

3.1.3 Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя [1, с. 47, формула 1.132]:

$$\Delta\vartheta_{\text{пов1}} = K \cdot \frac{P_{\text{э.л1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_1 \cdot \alpha_1} = 0,22 \cdot \frac{6,47 + 6,07}{3,14 \cdot 44 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 5,43 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (3.3)$$

где при $2p = 2$: $K = 0,22$ - коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передается через станину непосредственно в окружающую среду, при $2p = 2$ и $D_a = 81 \text{ мм}$: $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$ - коэффициент теплоотдачи с поверхности [1, с. 48, таблица 1.12].

3.1.4 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора [1, с. 48, формула 1.133]:

$$\Delta\vartheta_{\text{из.л1}} = \frac{P_{\text{э.л1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_1} \cdot \left(\frac{b_{\text{из1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{d_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right); \quad (3.4)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{из.л1}} = \frac{6,47}{2 \cdot 18 \cdot 33 \cdot 10^{-3} \cdot 37 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(\frac{0}{0,16} + \frac{6,1 \cdot 10^{-3} + 8,1 \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 0,89} \right) = 0,152^{\circ}\text{C},$$

где $\Pi_{\text{л1}}$ — расчетный периметр поперечного сечения паза статора:

$$\Pi_{\text{л1}} = 2 \cdot h_{\text{л1}} + d_1 + b_2 = 2 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3} + 6,1 \cdot 10^{-3} + 8,1 \cdot 10^{-3} = 0,033 \text{ м}; \quad (3.5)$$

$$b_{\text{из1}} = 0;$$

$$\lambda'_{\text{эКВ}} = 0,86 \text{ для } \frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{из}}} = \frac{0,28 \cdot 10^{-3}}{0,315 \cdot 10^{-3}} = 0,89 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)} [1, \text{С. 49, рисунок 1.14];}$$

$$d_{\text{эл}} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad d_{\text{из}} = 0,315 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

для изоляции класса нагревостойкости F : средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции $\lambda_{\text{эКВ}} = 0,16 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C)}$.

3.1.5 Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей [1, с. 68, формула 1.134]:

$$\Delta\vartheta_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{э.л1}}}{2 \cdot Z_1 \cdot \Pi_{\text{л1}} \cdot l_{\text{л1}}} \cdot \left(\frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{эКВ}}} + \frac{h_{\text{л1}}}{12 \cdot \lambda'_{\text{эКВ}}} \right); \quad (3.6)$$

$$\Delta\vartheta_{\text{из.л1}} = \frac{21,02}{2 \cdot 18 \cdot 0,033 \cdot 0,1202} \cdot \left(\frac{0}{0,16} + \frac{9,4 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 0,87} \right) = 0,134 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

где $\Pi_{\text{л1}} = \Pi_{\text{л1}} = 0,033 \text{ м}$, $b_{\text{из.л1}} \approx 0$.

3.1.6 Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины [1, с. 49, формула 1.135]:

$$\Delta\vartheta_{\text{пов.л1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{э.л1}}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{\text{выл.1}} \cdot \alpha_1} = 0,22 \cdot \frac{21,02}{2 \cdot 3,14 \cdot 44 \cdot 10^{-3} \cdot 31,7 \cdot 10^{-3} \cdot 100} = 5,28 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (3.7)$$

3.1.7 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины [1, с. 49, формула 1.136]:

$$\Delta\vartheta'_{в1} = \frac{(\Delta\vartheta_{пов1} + \Delta\vartheta_{из.п1}) \cdot 2 \cdot l_1 + (\Delta\vartheta_{пов.л1} + \Delta\vartheta_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_1}{l_{ср.1}}, \quad (3.8)$$

$$\Delta\vartheta'_{в1} = \frac{(5,43 + 0,152) \cdot 2 \cdot 37 \cdot 10^{-3} + (5,28 + 0,134) \cdot 2 \cdot 120,2 \cdot 10^{-3}}{0,3143} = 5,45 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

3.1.8 Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды [1, с. 49, формула 1.137]:

$$\Delta\vartheta_B = \frac{\Sigma P'_B}{S_{кор} \cdot \alpha_B} = \frac{36,28}{77,6 \cdot 10^{-3} \cdot 13} = 35,96 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (3.9)$$

где $\Sigma P'_B$ - сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя [1, с. 49, формула 1.138]:

$$\Sigma P'_B = \Sigma P \cdot (1 - k) \cdot (P'_{э.п1} + P_{ст.очн}) - 0,9 \cdot P_{мех}; \quad (3.10)$$

$$\Sigma P'_B = 49,55 - (1 - 0,22) \cdot (6,47 + 6,07) - 0,9 \cdot 3,87 = 36,28 \text{ Вт},$$

где ΣP - сумма всех потерь в двигателе при номинальном режиме [1, с. 49, формула 1.139]:

$$\Sigma P' = \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{э1} + P_{э2}) = 47,03 + (1,07 - 1) \cdot (25,7 + 10,37) = 49,55 \text{ Вт}, \quad (3.11)$$

здесь из таблицы 1п.119 расчета: «Рабочие характеристики асинхронного двигателя» при $S_{ном}$: $\Sigma P = 47,03 \text{ Вт}$, $P_{э1} = 25,7 \text{ Вт}$, $P_{э2} = 10,3 \text{ Вт}$.

3.1.9 Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса, с учетом поверхности ребер станины [1, с. 50, формула 1.140]:

$$S_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot P_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{выл1}); \quad (3.12)$$

$$S_{кор} = (3,14 \cdot 81 \cdot 10^{-3} + 8 \cdot 64,8 \cdot 10^{-3}) \cdot (37 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 31,7 \cdot 10^{-3});$$

$$S_{кор} = 77,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2,$$

где P_p - условный периметр поперечного сечения ребер станины [1, с. 50, формула 1.141]:

$$P_p = 0,8 \cdot D_a = 0,8 \cdot 0,081 = 64,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (3.13)$$

где $\alpha_B = 13 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ - коэффициент подогрева, учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины [1, с. 50, таблица 1.13].

3.1.10 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды [1, с. 50, формула 1.142]:

$$\Delta\vartheta_1 = \Delta\vartheta'_{B1} + \Delta\vartheta_B = 5,45 + 35,96 = 41,41^\circ\text{C}. \quad (3.14)$$

3.1.11 Таким образом, значение среднего превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды для принятого класса изоляции F , где допустимое значение - 105°C должно быть на 10% меньше, полученное расчетное значение $41,4^\circ\text{C}$ удовлетворяет условиям.

3.2 Расчет вентиляции

Вентиляционный расчет АД заключается в сопоставлении расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

3.2.1 Требуемый расход воздуха для охлаждения [1, с. 50, формула 1.143]:

$$Q_B = \frac{K_M \cdot \Sigma P'_B}{1100 \cdot \Delta\vartheta_B} = \frac{4,053 \cdot 36,28}{1100 \cdot 35,96} = 3,717 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3.15)$$

где k_m - коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором [1, с. 50, формула 1.144]:

$$K_M = m \cdot \frac{n}{100} \cdot D_a = 2,6 \cdot \frac{3000}{100} \cdot 81 \cdot 10^{-3} = 4,053, \quad (3.16)$$

где $m = 2,6$ при $2p = 2$.

3.2.2 Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, приближенно [1, с. 51, формула 1.145]:

$$Q'_B = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot (81 \cdot 10^{-3})^3 \cdot \frac{3000}{100} = 9,57 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3.17)$$

3.2.3 Полученное значение расхода воздуха, обеспечиваемого вентилятором больше значения, необходимого для охлаждения двигателя, что соответствует требованиям.

4. Механический расчет

4.1 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 в середине длины магнитопровода. Массой остальных частей вала можно пренебречь.

4.1.1 Принимая, что ротор двигателя представляет собой сплошной цилиндр, с плотностью 8300 кг/м^3 , его массу можно определить по формуле [2, с. 244]:

$$m_p = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot (43,5 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 37 \cdot 10^{-3} = 0,4551 \text{ кг},$$

где D_2 - внешний диаметр ротора; (4.1)

l_2 - длина сердечника ротора.

4.1.2 Сила тяжести ротора

$$G_p = 9,81 \cdot m_p = 9,81 \cdot 0,4451 = 4,465 \text{ Н} \quad (4.2)$$

4.1.3 Номинальный вращающий момент [2, с. 246]:

$$M_{ном} = 9,55 \cdot \frac{P_{2н}}{n_{ном}} = 9,55 \cdot \frac{90}{2718} = 0,316 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (4.3)$$

где $n_{ном} = n \cdot (1 - S_{ном}) = 3000 \cdot (1 - 0,094) = 2,718 \cdot 10^3 \text{ об/мин.}$ (4.4)

Сочленение двигателя с приводом через эластичную муфту при диаметре выходного конца вала 9 мм диаметр муфты по центрам пальцев: $D_{м1} = 71 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ [2, с. 192].

Схема сил, действующих на вал, для расчета приведена на рисунке 4.1.

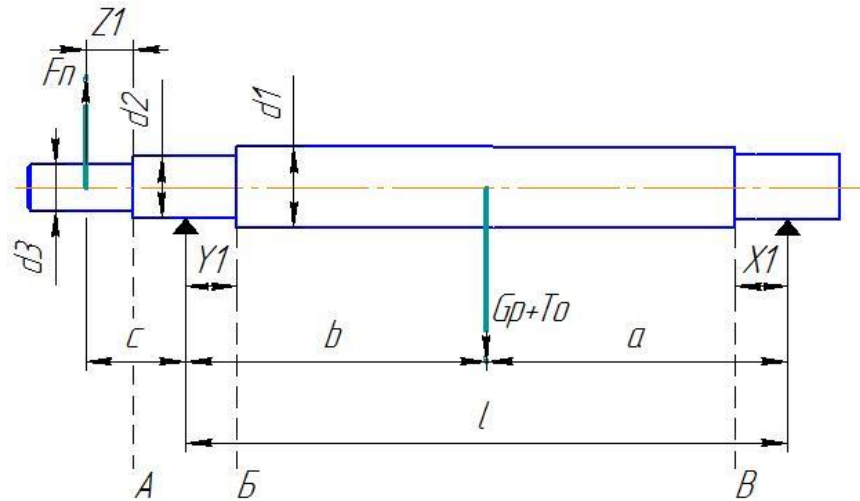


Рисунок 4.1 Схема горизонтально расположенного вала.

4.1.4 Поперечные силы, приложенные к выступающему концу вала, вызванные неточностью сопряжения вала и изготовлением детали муфты [2, с. 246, формула 8.17]:

$$F_{II} = \frac{k_{II} \cdot M_{НОМ}}{0,5 \cdot D_{M1}} = \frac{0,3 \cdot 0,316}{0,5 \cdot 71 \cdot 10^{-3}} = 2,672 \text{ Н}, \quad (4.5)$$

где $k_{II} = 0,3$ – коэффициент, при передаче муфтой.

4.1.5 Экваториальный момент инерции вала

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \quad (4.6)$$

Параметры участков вала приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Параметры участков вала

№ участка вала	Правая часть					
	$d_i, \text{ м}$	$J_i, \text{ м}^4$	$x_i, \text{ м}$	$x_i^3, \text{ м}^3$	$x_i^3 - x_{i-1}^3, \text{ м}^3$	$\frac{(x_i^3 - x_{i-1}^3)}{J_i}, \text{ м}^{-1}$
1	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,018 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$2,16 \cdot 10^{-7}$	212
$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64}; \quad S_a = \sum \frac{(x_i^3 - x_{i-1}^3)}{J_i} = 212 \text{ м}^{-1}$						
№ участка вала	Левая часть					
	$d_i, \text{ м}$	$J_i, \text{ м}^4$	$y_i, \text{ м}$	$y_i^3, \text{ м}^3$	$y_i^3 - y_{i-1}^3, \text{ м}^3$	$\frac{(y_i^3 - y_{i-1}^3)}{J_i}, \text{ м}^{-1}$
1	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$1,018 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-3}$	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$2,16 \cdot 10^{-7}$	212
$J = \frac{\pi \cdot d^4}{64}; \quad S_b = \sum \frac{(y_i^3 - y_{i-1}^3)}{J_i} = 212 \text{ м}^{-1}$						
	$y_i^2, \text{ м}^2$		$y_i^2 - y_{i-1}^2, \text{ м}^2$		$\frac{(y_i^2 - y_{i-1}^2)}{J_i}, \text{ м}^{-2}$	
1	$3,6 \cdot 10^{-5}$		$3,6 \cdot 10^{-5}$		$3,536 \cdot 10^4$	
$S_o = \sum \frac{(y_i^2 - y_{i-1}^2)}{J_i} = 3,536 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$						

Для определения прогиба вала воспользуемся аналитическим методом. Разбиваем вал на три участка: $a = 0,054 \text{ м}$, $b = 0,054 \text{ м}$, $c = 0,024 \text{ м}$.

4.1.6 Определим прогиб вала под действием силы тяжести в середине сердечника ротора [2, с. 245, формула 8.15]:

$$f_G = \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (a^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a), \quad (4.7)$$

$$f_G = \frac{4,465}{3 \cdot (108 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} \cdot ((5,4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 212 + (5,4 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 212),$$

$$f_G = 7,658 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

где $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ – модуль упругости [2, с.246].

$$l = 0,108 \text{ м}.$$

4.1.7 Прогиб вала от поперечной силы муфты в середине магнитопровода ротора [2, с. 246, формула 8.19]:

$$f_{II} = \frac{F_p \cdot c}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot \left(\left(\frac{3}{2} \cdot l \cdot S_o - S_b \right) \cdot a + b \cdot S_a \right), \quad (4.8)$$

$$f_{II} = \frac{2,672 \cdot 0,024}{3 \cdot (108 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} \cdot \left(\left(\frac{3}{2} \cdot 108 \cdot 10^{-3} \cdot 3,536 \cdot 10^4 - 212 \right) \cdot 5,4 \cdot 10^{-2} + 5,4 \cdot 10^{-2} \cdot 212 \right) = 2,972 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

4.1.8 Первоначальное смещение ротора [2, с. 247, формула 8.20]:

$$e_o = 0,1 \cdot \delta + f_G + f_{II} = 0,1 \cdot 2,5 \cdot 10^{-4} + 7,658 \cdot 10^{-10} + 2,972 \cdot 10^{-7} = 2,53 \cdot 10^{-5} \text{ м} \quad (4.9)$$

4.1.9 Начальная сила одностороннего магнитного притяжения при числе полюсов $2p=2$:

$$T_o = D_2 \cdot l_2 \cdot \frac{e_o}{\delta} \cdot 10^5 = 43,5 \cdot 10^{-3} \cdot 108 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2,53 \cdot 10^{-5}}{2,5 \cdot 10^{-4}} \cdot 10^5 = 47,54 \text{ Н} \quad (4.10)$$

4.1.10 Прогиб от силы одностороннего магнитного притяжения

$$f_T = \frac{f_G \cdot T_o}{G_p} = \frac{7,658 \cdot 10^{-10} \cdot 47,54}{4,465} = 8,154 \cdot 10^{-9} \text{ м} \quad (4.11)$$

4.1.11 Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения

$$f_M = \frac{f_T}{1 - m} = \frac{8,154 \cdot 10^{-9}}{1 - 3,22 \cdot 10^{-4}} = 8,16 \cdot 10^{-9} \text{ м}, \quad (4.12)$$

$$\text{где } m = \frac{f_T}{e_o} = \frac{8,154 \cdot 10^{-9}}{2,53 \cdot 10^{-5}} = 3,22 \cdot 10^{-4} \quad (4.13)$$

4.1.12 Суммарный прогиб в середине магнитопровода ротора

$$f = f_M + f_G + f_{II} = 8,16 \cdot 10^{-9} + 7,658 \cdot 10^{-10} + 2,972 \cdot 10^{-7} = 3,061 \cdot 10^{-7} \text{ м.} \quad (4.14)$$

$$\Delta f = \frac{f \cdot 100}{\delta} = \frac{3,061 \cdot 10^{-7} \cdot 100\%}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 0,12 \% \quad (4.15)$$

4.1.13 Критическая частота вращения вала

$$n_K = 30 \cdot \sqrt{\frac{1-m}{f_G}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1-3,22 \cdot 10^{-4}}{7,658 \cdot 10^{-10}}} = 10,839 \cdot 10^5 \text{ об/мин.} \quad (4.16)$$

4.1.14 Согласно рекомендациям [2, с. 247], при применении упругой соединительной муфты суммарный прогиб вала не должен превышать 10% длины воздушного зазора. Условие выполняется: Δf составляет 0,12 % от воздушного зазора.

Критическая частота вращения вала должна быть не ниже 130% от номинальной $1,3 \cdot n_{ном} = 1,3 \cdot 2,718 \cdot 10^3 = 3533 \text{ об/мин}$
 $10,839 \cdot 10^5 \text{ об/мин.} > 3533 \text{ об/мин.}$, что удовлетворяет условию.

4.2 Расчет вала на прочность

Вал двигателя при передаче вращающего момента испытывает изгибающие усилия от магнитного притяжения, сил тяжести, поперечных сил на свободном конце. В следствии этого на вал совместно действуют напряжения изгиба и напряжения кручения. Таким образом для определения прочности вала необходимо определить изгибающий момент и момент сопротивления при изгибе и напряжения в сечении каждой его ступени.

4.2.1 Напряжение в сечении A (для участка c) на свободном конце:

$$\sigma_A = \frac{\sqrt{M_{IIA}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2}}{W_A} = \frac{\sqrt{(5,344 \cdot 10^{-3})^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 0,316)^2}}{7,29 \cdot 10^{-8}} = 6,936 \cdot 10^5 \text{ Па,} \quad (4.18)$$

где изгибающий момент в расчетном сечении:

$$M_{IIA} = k \cdot F_{II} \cdot Z_1 = (2 \cdot 2,672 \cdot 0,001) = 5,344 \cdot 10^{-3} \text{ Н·м;} \quad (4.19)$$

момент сопротивления при изгибе:

$$W_A = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot (9 \cdot 10^{-3})^3 = 7,29 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3, \quad (4.20)$$

$k = 2$ - коэффициент перегрузки;

$\alpha = 0,8$ – коэффициент для реверсивных двигателей.

4.2.2 Напряжение в сечении B (для участка b)

$$\sigma_B = \frac{\sqrt{M_{IB}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2}}{W_B} = \frac{\sqrt{2,435^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 0,316)^2}}{1,728 \cdot 10^{-7}} = 1,439 \cdot 10^7 \text{ Па}, \quad (4.21)$$

где изгибающий момент в расчетном сечении

$$M_{IB} = k \cdot F_{II} \cdot c \cdot \left(1 - \frac{y_1}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \alpha \cdot \frac{y_1}{l}; \quad (4.22)$$

$$M_{IB} = 2 \cdot 2,672 \cdot 0,024 \cdot \left(1 - \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,108}\right) + (4,465 + 47,588) \cdot 0,8 \cdot \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,108} = 2,435 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

момент сопротивления при изгибе

$$W_B = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,012^3 = 1,728 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3$$

нагрузка от установившегося магнитного напряжения:

$$T = \frac{T_o}{1 - m} = \frac{47,54}{1 - 3,22 \cdot 10^{-4}} = 47,588 \text{ Н}$$

4.2.3 Напряжение в сечении B (для участка a)

$$\sigma_B = \frac{\sqrt{M_{IB}^2 + (k \cdot \alpha \cdot M_H)^2}}{W_B} = \frac{\sqrt{0,163^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 0,316)^2}}{3,652 \cdot 10^{-7}} = 1,455 \cdot 10^7 \text{ Па}, \quad (4.23)$$

где изгибающий момент в расчетном сечении

$$M_{IB} = (k \cdot F_{II} \cdot c + (G_p + T) \cdot b) \cdot \frac{x_1}{l}; \quad (4.24)$$

$$M_{IB} = (2 \cdot 2,672 \cdot 0,024 + (4,465 + 47,588) \cdot 0,054) \cdot \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,108} = 0,163 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

момент сопротивления при изгибе

$$W_B = 0,1 \cdot d^3 = 0,1 \cdot 0,0154^3 = 3,652 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3. \quad (4.25)$$

4.2.5 Предел текучести для стали марки 45:

$$\sigma_{пр} = 3600 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

4.2.6 Полученные значения $\sigma_A = 6,936 \cdot 10^5 \text{ Па}$, $\sigma_B = 1,439 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $\sigma_B = 1,455 \cdot 10^7 \text{ Па}$ меньше допускаемого значения $0,7 \cdot \sigma_{пр} = 2,52 \cdot 10^8 \text{ Па}$ – вал удовлетворяет всем требованиям механических расчетов.

4.3 Выбор подшипников

При определении радиальных нагрузок на подшипники исходим из наихудшего случая.

4.3.1 Радиальная нагрузка на подшипник со стороны выходного конца вала

$$R_{a1} = F_{II} \cdot \frac{c}{l} + (G_p + T_o) \cdot \frac{b}{l}; \quad (4.26)$$

$$R_{a1} = 2,672 \cdot \frac{0,024}{0,108} + (4,465 + 47,54) \cdot \frac{0,054}{0,108} = 26,596 \text{ Н.}$$

4.3.2 Радиальная нагрузка на подшипник со стороны контактного узла

$$R_{a2} = F_{II} \cdot \frac{c+l}{l} + (G_p + T_o) \cdot \frac{a}{l}; \quad (4.27)$$

$$R_{a2} = 2,672 \cdot \frac{0,024 + 0,108}{0,108} + (4,465 + 47,54) \cdot \frac{0,054}{0,108} = 29,268 \text{ Н.}$$

4.3.3 Принимаем нагрузку с умеренными толчками $k_H = 1,5$ - коэффициент, учитывающий характер нагрузки. Приведённая динамическая нагрузка для однорядных радиальных подшипников

$$Q_1 = k_H \cdot R_{a1} = 1,5 \cdot 26,596 = 39,89 \text{ Н,} \quad (4.28)$$

$$Q_2 = k_H \cdot R_{a2} = 1,5 \cdot 29,268 = 43,9 \text{ Н.} \quad (4.29)$$

4.3.4 Принимаем расчётный срок службы подшипников $L_D = 18000$ часов, наибольшая частота вращения 3000 об/мин.

4.3.5 Необходимая динамическая грузоподъёмность шарикоподшипника со стороны выходного конца вала

$$C_1 = \frac{Q_1}{25,6} \cdot \sqrt[3]{(L_D \cdot n)} = \frac{39,89}{25,6} \cdot \sqrt[3]{(18000 \cdot 3000)} = 588,96 \text{ Н.} \quad (4.30)$$

4.3.6 Необходимая динамическая грузоподъёмность шарикоподшипника со стороны контактного узла

$$C_2 = \frac{Q_2}{25,6} \cdot \sqrt[3]{(L_D \cdot n)} = \frac{43,9}{25,6} \cdot \sqrt[3]{(18000 \cdot 3000)} = 648,17 \text{ Н.} \quad (4.31)$$

4.3.7 Для правой и левой опоры вала диаметром 12 мм выбираем шарикоподшипники средней серии 301 ГОСТ 8338 – 75 с динамической грузоподъёмностью $C = 7500$ Н.

В данном разделе выпускной квалификационной работы определен суммарный прогиб вала от действия силы тяжести ротора и поперечной силы, обусловленной соединением муфтой. Полученный прогиб не превышает 10% от воздушного зазора. По критической частоте и напряжениям в опасных сечениях, вал имеет запасы. В ходе работы были выбраны подшипники, динамическая грузоподъемность которых не превосходит нормируемых.

Таким образом, сконструированный вал, исходя из условия механической прочности, можно использовать в данной электрической машине.

5. Расчет динамических параметров

5.1 Динамический момент инерции ротора по [1, с. 51, формула 1.148]:

$$J_g = k_u \cdot D^4 \cdot l_2 \cdot 10^3 = 0,78 \cdot (44 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 37 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{м}^2,$$

где $k_u = 0,78$ при $2p = 2$. (5.1)

5.2 Допустимое число пусков за один час на холостом ходу:

$$h_{\text{оп}} = 3600 \cdot \left(\frac{\Sigma P_{\text{н}}}{\Sigma P_0} \right) = 3600 \cdot \frac{50,78}{18,13} = 10085, \quad (5.2)$$

где $\Sigma P_{\text{н}}$ — суммарные потери двигателя в номинальном режиме,

ΣP_0 — суммарные потери двигателя за один пуск на холостом ходу,

$i_{\text{н}}^2 = 4,66$; $m_{\text{н}} = 2,31$ [1, с. 51, формула 1.146]:

$$\Sigma P_0 = \frac{J_g \cdot n_1^2}{180} \cdot \left[1 + \frac{P_{\text{эл}} \cdot i_{\text{н}}^2 \cdot (1 - S_{\text{ном}})}{m_{\text{н}} \cdot P_{2\text{н}}} \right], \quad (5.3)$$

$$\Sigma P_0 = \frac{1,0564 \cdot 10^{-4} \cdot 3000^2}{180} \cdot \left[1 + \frac{25,698 \cdot 4,66^2 \cdot (1 - 0,094)}{2,31 \cdot 90} \right] = 18,1 \text{ Вт}.$$

5.3 Допустимое число реверсов в один час при холостом ходе [1, с. 51, формула 1.147]:

$$h_{\text{ор}} = 0,3 \cdot h_{\text{оп}} = 0,3 \cdot 10085 = 3025. \quad (5.4)$$

5.4 Скорость нарастания температуры при пуске (принимается равной начальной скорости температуры при заторможенном роторе) [1]:

$$\vartheta_t = \frac{(i_{\text{н}} \cdot J_1)^2}{N} = \frac{(4,66 \cdot 4,54)^2}{200} = 2,24 \text{ } ^\circ\text{C/с}, \quad (5.5)$$

где $N = 200$, если пуск начат из холодного состояния двигателя,

$$J_1 = 4,54 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

5.5 Если пуск начат при расчетной рабочей температуре двигателя,

то $N = 146$ для изоляционной системы класса нагревостойкости F [1]:

$$\vartheta_{t \text{ пр}} = \frac{(i_{\text{н}} \cdot J_1)^2}{N} = \frac{(4,66 \cdot 4,54)^2}{146} = 3,03 \text{ } ^\circ\text{C/с}.$$

6. Технологическая часть

Технологический процесс общей сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

6.1 Введение

Процесс сборки является заключительным этапом изготовления машины. Правильно выбранный технологический процесс и качественное выполнение всех операций определяют надежность, долговечность и энергетические показатели электрических машин.

Технологический процесс сборки представляет собой совокупность операций по соединению деталей в определенной, технически и экономически целесообразной последовательности для получения сборочных единиц и изделий, полностью отвечающих установленным требованиям.

На сборочные работы требуются большие затраты физического труда и высокая квалификация персонала, так как основной частью слесарно - сборочных работ является ручная сборка.

Затраты времени на проведение сборочных работ зависят от типа производства, характеризуемого объемом выпуска изделий.

Заданная программа выпуска 5000 штук изделий в год определяет построение технологического процесса сборки в условиях серийного производства.

К исходным данным для разработки технологического процесса общей сборки, проектируемого асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором служит базовая информация: программа выпуска и конструкторская документация: сборочный чертеж, спецификация.

6.2 Оценка технологичности конструкции

Основными технологическими требованиями, предъявляемыми к конструкции сборочной единицы при сборке, является обеспечение возможности снижения трудоемкости, стоимости, и сокращение цикла узловой и общей сборки; возможность сборки из обособленных сборочных единиц без повторных разборок; сокращение до минимума объема пригоночных работ.

Для серийного производства общая сборка данной электрической машины осуществляется из сборочных единиц (узлов), прошедшие контроль качества, деталей и стандартных изделий, что позволяет существенно сократить общее время сборки, повысить производительность труда.

Для того, что бы лучше провести оценку проектируемого двигателя на технологичность и учесть возможные пути сборки - проведем описание конструкции изделия и анализ его служебного назначения.

Проектируемый асинхронный короткозамкнутый двигатель 90 Вт предназначен для эксплуатации на открытом воздухе или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе.

Исполнение по способу монтажа - IM1081. Это означает, что двигатель с одним цилиндрическим концом вала и может работать с любым направлением конца вала, на лапах с подшипниковыми щитами.

Исполнение по степени защиты от воздействия окружающей среды – IP44. Это указывает на то, что оболочка обеспечивает защиту от прикосновения к токоведущим частям пальцами или инструментом, защиту от брызг воды, которые могут быть направлены на изделие с любого направления и что пыль может проникать внутрь оболочки двигателя, но в количествах недостаточных для нарушения его работы. Режим работы двигателя - продолжительный (S1). Способ охлаждения двигателя IC0141 - обдувом с помощью внешнего вентилятора, расположенного на валу двигателя.

Двигатель выполнен на напряжение 380 В и развивает полезную мощность на валу 90 Вт при синхронной частоте вращения 3000 об/мин.

Проектируемый двигатель состоит из статора (поз. 1), в сердечнике которого уложена трехфазная обмотка, ротора (поз. 2), который имеет конструкцию, аналогичную роторам общепромышленного назначения, в пазах литая короткозамкнутая обмотка, для заливки ротора применяется алюминий.

На вал ротора напрессованы шарикоподшипники с двумя резиновыми уплотнениями со смазкой, заложенной в них при изготовлении на весь срок службы (поз. 9). Ротор ориентируется относительно расточки статора с помощью подшипниковых щитов (поз. 5). Для уменьшения осевых перемещений ротора в проточку подшипникового щита со стороны вентилятора (поз. 6) установлено пружинное кольцо (поз. 7).

Подшипниковые щиты изготовлены по упрощённой схеме конструкций без подшипниковой крышки. После установки на станину статора крепятся болтами (поз. 10) по шесть штук на каждый щит. На статоре установлена коробка выводов (поз. 3), в которой расположена клеммная колодка с присоединенными выводами обмотки статора.

В паз на ступени вала под вентилятор установлена шпонка (поз. 14), на которую закрепляется вентилятор (поз. 6). На конце вала установлено запорное кольцо (поз. 9), чтобы вентилятор не перемещался вдоль вала.

На станине со стороны вентилятора тремя винтами (поз. 13) закреплён кожух (поз. 4).

Технологичность конструкции — это совокупность свойств проектируемого изделия, определяющих возможность достижения минимальных затрат по сравнению с однотипными конструкциями того же назначения при заданном уровне качества и принятых условиях изготовления, эксплуатации, ремонте.

Проведем оценку технологичности двигателя:

— конструкция двигателя позволяет расчленить ее на самостоятельные узлы с целью обеспечения возможности их параллельной сборки, автономного контроля, испытания, замены: статор (поз. 1), ротор (поз.

2), коробка выводов (поз. 3), кожух (поз. 4). При этом каждый из узлов содержит не более 12 деталей;

- из стандартных изделий в двигателе только болты, винты, шайбы, шпонки и подшипники. В случае выпуска серии могут быть унифицированы подшипниковые щиты, крышка коробки выводов, кожух;

- исключена необходимость проведения промежуточной разборки и повторной сборки его составных частей;

- конструкция двигателя позволяет выполнить общую сборку по методу полной взаимозаменяемости;

- конструкция двигателя обеспечивает свободный доступ сборочных инструментов и средств контроля к местам соединения деталей и контроля;

- конструкция двигателя позволяет выполнить сборку вдоль главной оси симметрии и сверху;

- в конструкции двигателя 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 базовые опорные поверхности и позволяет производить сборку в основном без изменения ее положения;

- плоскости разъемов подшипниковых щитов со станиной двигателя расположены перпендикулярно к главной базовой оси симметрии, что упрощает ориентирование при сборке;

- применение резьбовых соединений для фиксации щитов на станине снижает технологичность конструкции, но обеспечивает возможность разборки двигателя, например, для ремонта;

- для перемещения сборочных единиц на небольшие расстояния не требуются грузоподъемные механизмы.

6.3 Размерный анализ конструкции электродвигателя методом полной взаимозаменяемости

Проектирование технологических процессов при конструировании машин и их изготовлении производят размерный анализ, с помощью которого достигают правильного соотношения взаимосвязанных размеров и определяют допустимые отклонения (допуски).

Одним из средств определения рациональных допусков является расчет и анализ размерных цепей.

Размерный анализ проводим методом полной взаимозаменяемости для цепей показанных на рисунке 6.1, здесь составляющие звенья обозначаются буквами А и С, замыкающие звенья обозначены Х, цифры обозначают порядковый номер.

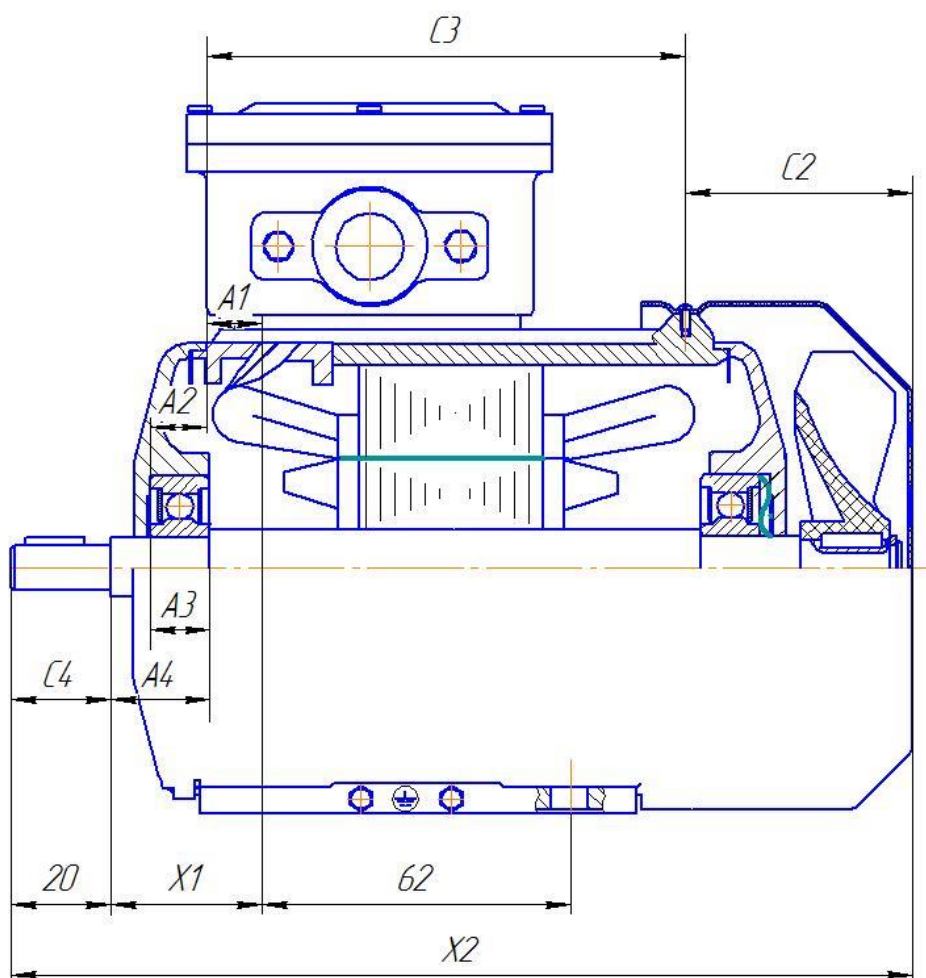


Рисунок 6.1 Эскиз двигателя с размерными цепями.

6.3.1 Выявим размеры и для них составим две размерные цепи рисунок 6.2.

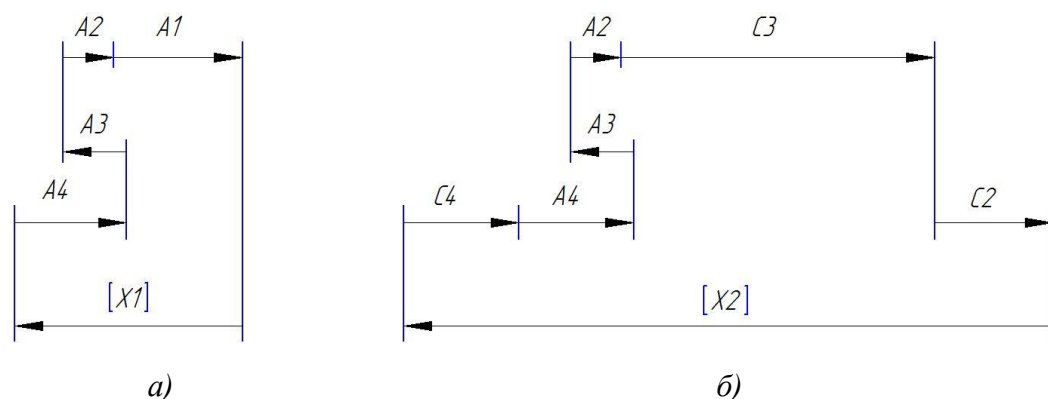


Рисунок 6.2 Размерные цепи двигателя:

а) – для замыкающего звена $X1$; б) – для замыкающего звена $X2$.

$X1$ – расстояние между уступом на валу, в который будет упираться муфта при монтаже, и осью ближайшего монтажного отверстия в лапе станины (размер заказчика). Обеспечение которого обязательно.

$X2$ – габаритный размер (размер заказчика), результат сборки.

$A1$ – расстояние от торца замковой части поверхности станины до оси отверстия в лапе станины,

$A2$ – расстояние от торцевой поверхности отверстия под подшипник в ступице подшипникового щита до торца замковой части поверхности подшипникового щита со станиной,

$A3$ – осевой размер подшипника;

$A4$ – размер ступени вала,

$C2$ – расстояние от оси соединения кожуха со станиной до торца кожуха,

$C3$ – расстояние от оси соединения станины с кожухом до торца замковой части поверхности станины,

$C4$ – размер ступени вала.

Необходимо найти допуск на замыкающие звенья:

6.3.2 Исходные данные:

$$X1 = 32 \pm 0,1 (\text{мм})$$

$$X2 = 178 \pm 0,15 (\text{мм})$$

6.3.3 Запишем исходные длины составляющих звеньев и результаты расчетов, допусков, отклонений сведем в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 Номинальные размеры и допуски составляющих звеньев.

Размер	Квалитет	Отклонение	Допуск
<i>мм</i>		<i>мм</i>	<i>мм</i>
A1 = 13	H8	+ 0,027	0,027
A2 = 11	H8	+ 0,027	0,027
A3 = 12	f9	- 0,016 - 0,059	0,043
A4 = 20	H9	+0,052	0,052
C2 = 46	H8	+0,039	0,039
C3 = 93	H8	+0,054	0,054
C4 = 20	H9	+0,052	0,052

6.3.4 Допуск на замыкающее звено:

$$T_{X1} = ES - EI = 0,1 - (- 0,1) = 0,2 \text{ мм}; \quad (6.1)$$

$$T_{X2} = 0,15 - (-0,15) = 0,3 \text{ мм},$$

где ES - верхнее предельное отклонение,

EI - нижнее предельное отклонение.

6.3.5 Для общего случая уравнения размерных цепей имеют вид:

уравнение в номиналах:

$$X = \sum_{i=1}^m A_{ув_i} - \sum_{k=1}^n A_{ум_i}, \quad (6.2)$$

где: X – замыкающее звено;

$A_{ув_i}$ – увеличивающие звенья;

$A_{ум_i}$ – уменьшающие звенья;

m – число увеличивающих звеньев;

n – число уменьшающих звеньев.

Запишем уравнения для размерных цепей, представленных на рисунке 6.2.

Для замыкающего звена $X1$:

$$X1 = (A1 + A2 + A4) - A3 = (13 + 11 + 20) - 12 = 32 \text{ мм}.$$

Для замыкающего звена $X2$:

$$X_2 = (C_2 + C_3 + A_2 + A_4 + C_4) - A_3 = (46 + 93 + 11 + 20 + 20) - 12 = 178 \text{ мм.}$$

Номинальные значения замыкающих звеньев обеспечиваются.

6.3.6 Средний размер составляющих звеньев

$$A_{cp} = \frac{\sum A_i}{m - 1}, \quad (6.3)$$

где A_j – составляющее звено, m – количество звеньев в цепи.

$$A_{cp1} = \frac{\sum A_i}{m - 1} = \frac{13 + 11 + 20 + 12}{5 - 1} = 14,0 \text{ мм;}$$

$$A_{cp2} = \frac{\sum A_i}{m - 1} = \frac{46 + 93 + 11 + 20 + 20 + 12}{7 - 1} = 33,67 \text{ мм.}$$

6.3.7 Подсчитаем средний допуск на замыкающее звено

$$T_{cpX1} = \frac{T_{X1}}{m - 1} = \frac{0,2}{5 - 1} = 0,05 \text{ мм;} \quad (6.4)$$

$$T_{cpX2} = \frac{T_{X2}}{m - 1} = \frac{0,3}{7 - 1} = 0,05 \text{ мм.} \quad (6.5)$$

6.3.8 Используя средний размер составляющих звеньев и величину среднего допуска найдем квалитет для каждого звена. Средний размер составляющих звеньев равен:

для X_1 : 9 квалитету: $14H9(^{+0,043})$.

для X_2 : 8 квалитету: $33H8(^{+0,038})$.

6.3.9 По рассчитанным квалитетам подбираем соответствующие допуски для составляющих звеньев и внесем в таблицу 6.1.

6.3.10 Запишем уравнение в допусках

$$T_X = \sum_{j=1}^{m+n} T_{Aj}, \quad (6.6)$$

где: T_X – допуск замыкающего звена;

T_{Aj} – допуски составляющих звеньев.

Для звена X_1 :

$$\Delta T_{X1} = T_{A1} + T_{A2} + T_{A3} + T_{A4} = 0,027 + 0,027 + 0,043 + 0,052 = 0,149 \text{ мм.} \quad (6.7)$$

Для звена X_2 :

$$\Delta T_{X2} = T_{C2} + T_{C3} + T_{A2} + T_{A4} + T_{C4} + T_{A3}; \quad (6.8)$$

$$\Delta T_{X2} = 0,039 + 0,054 + 0,027 + 0,052 + 0,052 + 0,043 = 0,267 \text{ мм.}$$

6.3.11 Условие $T_{X1} > \Delta T_{X1}$ и $T_{X2} > \Delta T_{X2}$ выполняется, следовательно расчет допусков на составляющие размеры произведен правильно.

6.3.12 Проведем проверку:

$$X^{max} = \sum A_{i_{yB}}^{max} - \sum A_{i_{yM}}^{min}, \quad (6.9)$$

$$X_{min} = \sum A_{i_{yB}}^{min} - \sum A_{i_{yM}}^{max}, \quad (6.10)$$

Для звена $X1$:

$$X1^{max} = 13,027 + 11,027 + 20,052 - 11,941 = 32,165 \text{ мм},$$

$$X1_{min} = 13 + 11 + 20 - 11,984 = 32,016 \text{ мм},$$

$$X1_{расчет} = 32^{+0,165}_{-0,016} \text{ мм}.$$

Для звена $X2$:

$$X2^{max} = 46,039 + 93,054 + 11,027 + 20,052 + 20,052 - 11,941 = 178,283 \text{ мм},$$

$$X2_{min} = 46 + 93 + 11 + 20 + 20 - 11,984 = 178,016 \text{ мм},$$

$$X2_{расчет} = 178^{+0,283}_{-0,016} \text{ мм}.$$

6.3.13 Расчетное значение замыкающих звеньев $X1$, $X2$ входит в диапазон заданного допуска звена.

6.4 Составление схемы сборки и маршрутной технологии общей сборки электрической машины

Схема сборки позволяет отразить маршрут сборки изделия, выделить составные части изделия, которые можно собирать отдельно (организовать параллельную сборку составных частей); оценить предварительно трудоемкость сборки отдельных составных частей; иногда выявить конструктивные неувязки; выявить и сравнить варианты технологического процесса. Технологическая схема сборки составляется в соответствии серийному типу производства и спецификации к сборочному чертежу изделия.

Спецификация является главным документом в сборочном чертеже. Она определяет комплектацию рабочего места: содержит обозначение составных частей, их наименования и количество.

Сборочный чертеж содержит изображение изделия и другие данные, необходимые для его сборки и контроля. Составные части сборочной единицы

подлежат соединению между собой сборочными операциями: свинчиванием, сочленением, клепкой, сваркой, пайкой, опрессовкой, развальцовкой, склеиванием и т. п.

На схеме каждый элемент изделия обозначают прямоугольником, в котором указывают наименование составной части, её обозначение и количество.

Процесс сборки изображен на схеме сборки асинхронного двигателя (Приложение Д). Здесь все основные сборочные единицы двигателя (статор, ротор, кожух, коробка выводов) уже собраны и схема показывает в какой последовательности их нужно соединить.

В качестве базовой детали принимаем статор (1). Установим его на верстак, закрепим коробку выводов (3) и выведем провода на клеммник, затем просовываем туда ротор в сборе (н/о), т. е. на роторе напрессованы подшипники, предварительно нагретые и смазанные. Ротор ориентируется относительно расточки статора с помощью подшипниковых щитов (5). Для уменьшения осевых перемещений ротора в проточку подшипникового щита со стороны крепления вентилятора установлена волнистая пружина (7) наденем подшипниковые щиты (5) и привернем болтами (10) по 6 штук на каждый. Установим вентилятор (6) на шпонку (14) и зафиксируем стопорным кольцом (9). Наденем кожух (4) на вентилятор (6) и закрепим к станине винтами (13). На выходном конце вала установим шпонку (14) и ввернем на станину болты заземления (11) с шайбами (12). Сборка двигателя готова.

Для проверки защемления вала от перекоса установки подшипниковых щитов, следует в ручную прокрутить вал в разные стороны пару раз. Далее двигатель идёт на приёмосдаточные испытания.

На основании выше сказанного, заполним маршрутную карту. (Приложение Е).

6.5 Выбор сборочного оборудования и оснастки

Содержание операции определяют тип, основные размеры и технологическую характеристику сборочного оборудования, технологической оснастки и подъемно-транспортных средств.

При серийном производстве технологическое оборудование и оснастку применяют универсального, переналаживаемого типа. Тип, основные размеры и грузоподъемность подъемно-транспортных средств определяют по установленной организационной форме сборки, размерной характеристике изделия и его массе.

6.5.1 Оборудование:

- Для сборки узлов изделия в целом применяют механизированную линию.
- Для испытания двигателя на механическую прочность и работу в режимах холостого хода и короткого замыкания используют испытательный стенд.
- Для проверки электрической прочности применяется высоковольтная установка 1500×1500 мм.

6.5.2 Выбор инструмента.

Для повышения производительности применяют механизированный инструмент.

- Для заворачивания болтов используют электрогайковёрт ИЭ 3113
наибольший диаметр резьбы 10 мм, момент затяжки 125 н·м, масса 3,8 кг, габаритные размеры 363×70×243 мм от сети 220 В.
- Для заворачивания винтов используют электровинтовёрт ИЭ 3606, наибольший диаметр резьбы 6 мм, момент затяжки 15 н·м, габаритные размеры 320×70×130 мм от сети 220 В.
- Сборка производится на верстаке.
- Для запрессовки подшипников применяют и оправки.

6.5.3 Приборы на испытательный стенд:

- 1 мегаомметр;
- 2 вольтметра;
- 2 амперметра;
- 1 ваттметр;
- 1 тахометр.

Амперметр и вольтметр универсальные, магнитоэлектрической системы, с выпрямительными мостами.

6.5.4 Выбор подъемно - транспортных средств

Для транспортировки деталей, сборочных единиц и готовых изделий применяется тележка. Для хранения используется ящик 300 × 200 мм.

6.6 Нормирование сборочных работ и расчет количества технологического оборудования

Отношение времени, затраченного на выполнения технологической операции, к числу изделий одновременно собираемых на одном рабочем месте характеризуется штучным временем. На каждую сборочную операцию устанавливают технически обоснованную норму времени, для этого применяют расчетно-аналитический метод.

6.6.1 Штучное время

$$T_{шт} = T_o + T_e + T_{об} + T_n , \quad (6.9)$$

где T_o - основное (технологическое) время;

T_e - вспомогательное время;

$T_{об} = 0,05 \cdot T_{он}$ - время организационного обслуживания рабочего места;

$T_n = 0,03 \cdot T_{он}$ - время перерывов для удовлетворения естественных надобностей и отдыха рабочего.

6.6.2 Элементы основного и вспомогательного времени тесно связаны между собой, поэтому при сборке нормируют и оперативное время

$$T_{он} = T_o + T_e \quad (6.10)$$

Основное время T_o - изменение состояния продукта производства в процессе сборки, затраченное на выполнение соединений, пригонку сопрягаемых деталей, регулирование, подбор и размерную сортировку деталей, подготовку деталей к сборке. Основное время нормируют по соответствующим нормативам.

Вспомогательное время T_e - действия, которые сопровождают и обеспечивают выполнение основной работы. Вспомогательное время находят суммированием элементов времени на выполнение перечисленных действий по всем переходам операции, устанавливаемых по нормативам вспомогательного времени.

Время организационного обслуживания рабочего места $T_{об}$ - подготовка рабочего места к началу работы, уборку рабочего места в конце смены, замены инструмента в процессе работы и т.п. Его определяют в процентах от оперативного времени по нормативам (обычно в пределах 0,5-8%).

Время перерывов в работе на отдых и личные надобности определяют по нормативам, в процентном отношении к оперативному времени (в среднем 2,5%).

6.6.3 При сборке изделий партиями вместо штучного времени $T_{шт}$ определяют штучно – калькуляционное $T_{шт.к.}$

$$T_{шт.к.} = T_{шт} + T_{пз/п}, \quad (6.11)$$

где $T_{пз} = 0,02 \cdot T_{оп}$ - подготовительно заключительное время, которое затрачивает сборщик на ознакомление с чертежом изделия, подготовку и наладку оборудования, приспособления и инструментов, снятие и сдачу инструментов и приспособлений после выполненной работы и сдачу собранных изделий;

$$n = N \cdot \frac{k}{12} = 5000 \cdot \frac{1,03}{12} = 430 \text{ шт/мес} - \text{число изделий в партии}, \quad (6.12)$$

где $N = 5000 \text{ шт/год}$ - годовая программа выпуска;

$k = 1,03$ - коэффициент учитывающий брак, 12 - количество месяцев в году.

6.6.4 Результаты нормирования сборочных работ занесём в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 - Нормы времени на операцию

Операция, оборудование	T_o	T_v	$T_{оп}$	$T_{об}$	T_n	$T_{шт}$	$T_{пз}$	$T_{шт.к}$
Расконсервация, автомат для продувки	2,0	0,1	2,1	0,11	0,063	2,24	0,042	2,24
Нагрев, установка для нагрева	3,0	0,15	3,15	0,16	0,095	3,4	0,063	3,4
Сборка, верстак	10,4	0,43	10,83	0,542	0,325	11,70	0,217	11,696
Контроль	2,0	0,1	2,1	0,11	0,063	2,24	0,042	2,24
Испытания двигателя, испытательный стенд	16,0	0,54	16,54	0,827	0,496	17,86	0,331	17,863
Окрашивание, краскопульт	3,1	0,01	3,11	0,156	0,093	3,36	0,062	3,36

6.6.5 Для определения потребного количества оборудования необходимо знать объем выпуска изделий – 5000, нормы времени (таблица 6.2), а эффективный годовой фонд времени работы одного станка при 40 – часовой рабочей неделе с двумя выходными можно рассчитать по формуле:

$$F_{\partial} = ((365 - B_{\partial} - P_{\partial}) \cdot 8 - P_{но}) \cdot K_p, \quad (6.13)$$

$$F_{\partial} = ((365 - 104 - 12) \cdot 8 - 6) \cdot 0,96 = 1907 \text{ часов},$$

где $B_{\partial} = 104$ – количество выходных дней в году;

$P_{\partial} = 12$ – количество праздничных дней в году;

$P_{но} = 6$ – количество предпраздничных дней в году;

$K_p = 0,96$ – коэффициент, учитывающий время пребывания станков в ремонте.

6.6.6 Расчётное число каждого из видов сборочного оборудования

$$C_p = \frac{T_{шт.к} \cdot N}{60 \cdot F_g}; \quad (6.14)$$

где $T_{шт.к}$ – сумма штучно – калькуляционного времени для одного станка;

$N = 5000$ – годовая программа выпуска изделий.

Проведем расчеты:

Автомат для продувки:

$$C_{pa} = \frac{2,24 \cdot 5000}{60 \cdot 1907} = 0,1, \quad \text{принимаем: } C_{пра} = 1;$$

Нагревательная ванна:

$$C_{рнв} = (3,4 \cdot 5000) / (60 \cdot 1907) = 0,15, \quad \text{принимаем: } C_{прнв} = 1;$$

Для верстака

$$C_{pv} = (11,696 \cdot 5000) / (60 \cdot 1907) = 0,511, \quad \text{принимаем: } C_{прв} = 1;$$

Для испытательного стенда:

$$C_{pc} = (17,863 \cdot 5000) / (60 \cdot 1907) = 0,78, \quad \text{принимаем: } C_{прс} = 1;$$

Для краскопульты:

$$C_{pc} = (3,36 \cdot 5000) / (60 \cdot 1907) = 0,147, \quad \text{принимаем: } C_{прс} = 1;$$

6.6.7 Коэффициент загрузки оборудования

$$K_z = \frac{C_p}{C_{np}} \cdot 100\%, \quad (6.15)$$

Автомат для продувки:

$$K_{за} = \frac{0,1}{1} \cdot 100\% = 10 \%$$

Установка для нагрева:

$$K_{знв} = \frac{0,15}{1} \cdot 100\% = 15 \%$$

Для верстака

$$K_{зв} = \frac{0,511}{1} \cdot 100\% = 51,1 \%$$

Для испытательного стенда

$$K_{зс} = \frac{0,78}{1} \cdot 100\% = 78 \%$$

Для краскопульты:

$$K_{зс} = \frac{0,147}{1} \cdot 100\% = 14,7 \%$$

6.6.8 Построим график загрузки оборудования рисунок 6.3:

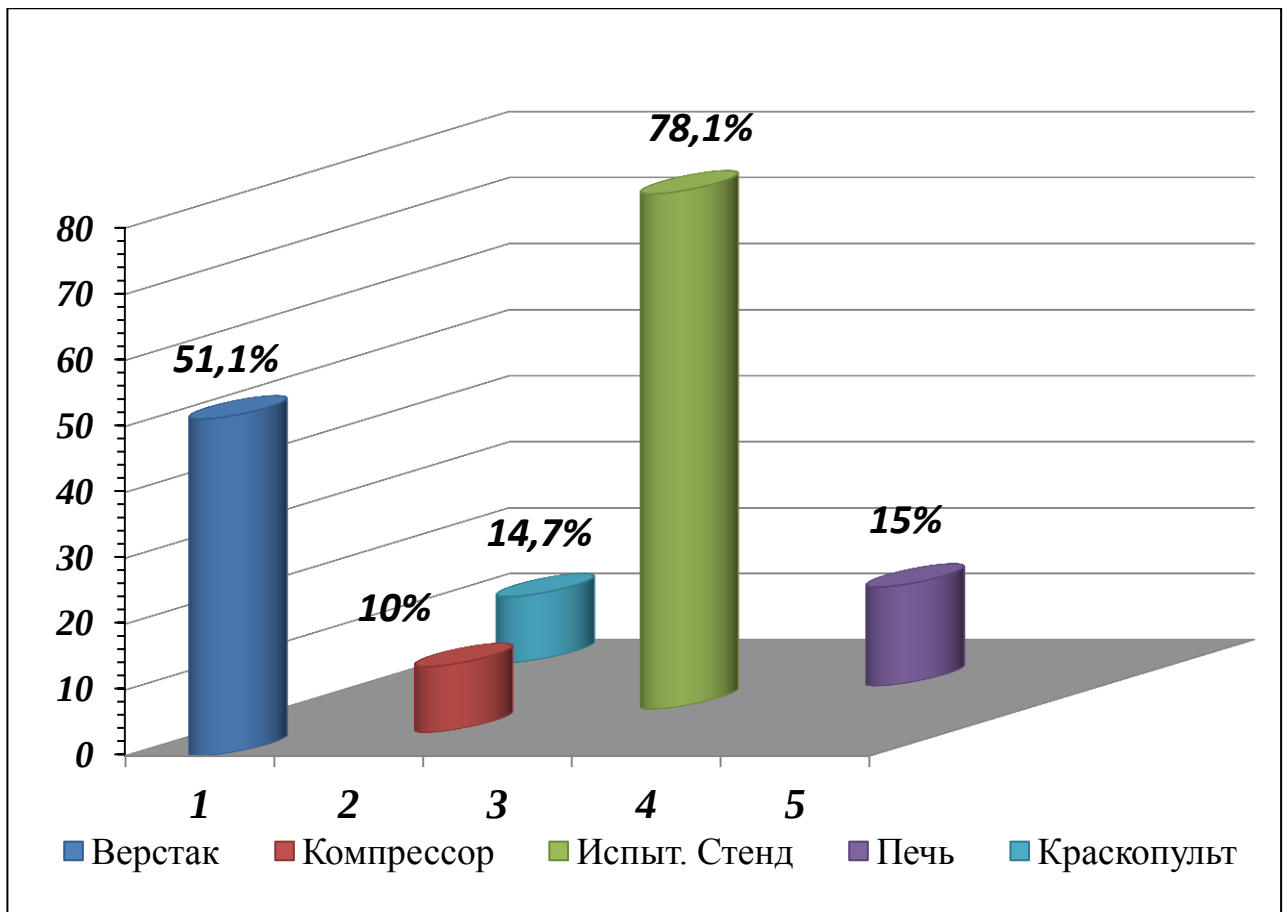


Рис. 6.3 - График загрузки оборудования

6.6.9 Для проверки программы выпуска в год выберем самое загруженное оборудование и рассчитаем, возможно ли выпустить нужное число изделий. В данном случае самым загруженным оборудованием является верстак в количестве одного.

Из формулы $C_p = \frac{T_{шт.к} \cdot N}{60 \cdot F_g}$ выразим N , подставив $C_{пр}$ вместо C_p .

$$N = \frac{60 \cdot F_g \cdot C_{пр}}{T_{шт.к}} = \frac{60 \cdot 1907 \cdot 1}{17,86} = 6406,5 \text{ шт/год.} \quad (6.16)$$

Программа выпуска выполняется, т.к. полученное количество выпускаемых изделий 6406 шт/год превышает годовую программу 5000 шт/год.

6.7 Заключение

В данном разделе выпускной квалификационной работы был выполнен анализ технологичности конструкции проектируемого асинхронного двигателя, определены достоинства и недостатки конструкции при изготовлении, определены основные требования, предъявляемые к конструкции в целом и узлам в отдельности.

Провели размерный анализ и расчет методом полной взаимозаменяемости, с помощью которого определили допустимые отклонения (допуски) и уточнили размеры составных частей двигателя.

Для сборки двигателя составлена схема сборки и разработана маршрутная карта, в которых отражена последовательность сборки машины, необходимое оборудование, приспособления, оснастка, средства индивидуальной защиты, а так же время, затраченное на выполнение каждой операции. Все операции, производимые в процессе сборки двигателя, описаны в маршрутной технологии.

При нормировании сборочных работ было определено операционное время, время на организацию обслуживания рабочего места, время перерывов, подготовительно - заключительное и штучное время.

Определено потребное количество оборудования, необходимого для выпуска изделий объемом 5000 шт/год, рассчитан и построен график загрузки оборудования.

По самому загруженному оборудованию проведена проверка выполнения программы выпуска изделий. Полученное значение количества выпускаемых изделий в год 6406 превысило заданное количество 5000 штук, программа выпуска выполняется.

7. Специальная часть

Важным условием правильного выбора и применения ЭМММ является, обеспечение соответствия требуемым техническим и эксплуатационным характеристикам системы автоматики таким, как точность, чувствительность, быстродействие, надежность и др.

На основании этих требований определяются основные электромеханические параметры электрической машины: напряжение питания и допустимое его отклонение, полезная мощность, момент на валу, частота вращения, пусковой момент, быстродействие, масса и габаритные размеры, напряжение трогания, КПД.

Задача, данного раздела, это провести исследование основных технических показателей проектируемого двигателя через соответствующие параметры для применения его в приводе вакуумного вентиля. В данном случае главным требованием к электрической машине является обеспечение быстродействия, т.е. способность двигателя достигать заданной частоты вращения за максимально короткое время. Быстродействие определяют динамические характеристики, характеризующиеся скоростью протекания электромагнитных и электромеханических переходных процессов, возникающих в двигателе при подаче сигнала управления.

Проведем исследования динамических характеристик спроектированного АД при работе на нагрузку промышленного вентиля.

Для этого используем параметрический метод, применяемый при проектировании электрических машин малой мощности в системе автоматизированного расчета (САПР), где важной частью математического обеспечения является математическая модель объекта, состоящая из совокупности базовых уравнений, описывающих характеристики и процессы, протекающие при работе исследуемой машины. Такой метод, предполагает целенаправленный выбор и сравнение только тех вариантов, которые

обеспечивают заданные характеристики и свойства, полученные на основе относительных величин.

Процессы проходящие во время работы в двигателе зависят от постоянных времени - электромагнитной и электромеханической. Значение электромагнитной постоянной времени, вследствие большого активного сопротивления ротора, становится на много меньше электромеханической. Таким образом, быстродействие двигателя определяется только электромеханической постоянной времени.

Базовыми значениями при определении относительных параметров двигателя принимаются ранее рассчитанные параметры схемы замещения, которые связаны с основными размерами машины, а также с величинами индукции в воздушном зазоре и плотности тока.

В качестве метода оценки динамических характеристик был использован метод виртуального моделирования в пакете прикладных программ Matlab Simulink. В качестве исходных данных были использованы параметры спроектированного АД, представленные в таблице 7.1.

Таблица 7.1 Параметры спроектированного асинхронного двигателя

$P, Вт$	$U, В$	$r_1, Ом$	$X_1, Ом$	$r_2', Ом$	$X_2', Ом$	$R_0, Ом$	$J_g, кг \cdot м^2$	$p, \text{число полюсов}$
90	380	109,6	53,67	90,7	46,2	0	0,00011	1

Составим схему для проверки работы асинхронного двигателя и определения скоростных характеристик рисунок 7.1.

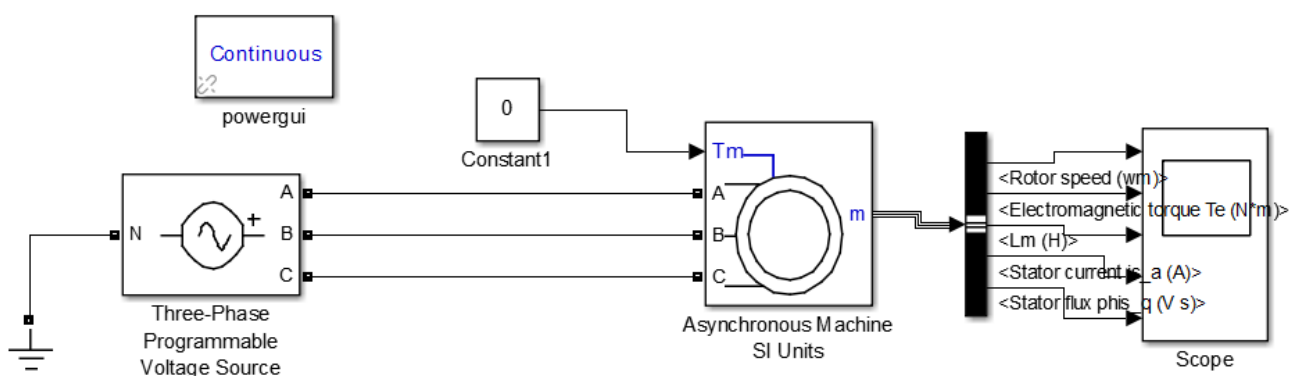


Рисунок 7.1 Схема для проверки работы АД и определения временных характеристик

Проведем исследования, тока статора и ротора, скорости вращения двигателя, его электромагнитного момента.

На вход модели подаются напряжения $u_{s\alpha} = \cos t$, $u_{s\beta} = \sin t$. В качестве измеряемых величин выбраны истинные значения скорости ω , электромагнитного момента $M_{эм}$, а также относительные значения тока статора $i_{s\beta}$ и потока $\Psi_{R\beta}$. Полученные результаты моделирования представлены на рисунках 7.2, 7.3.

На холостом ходу:

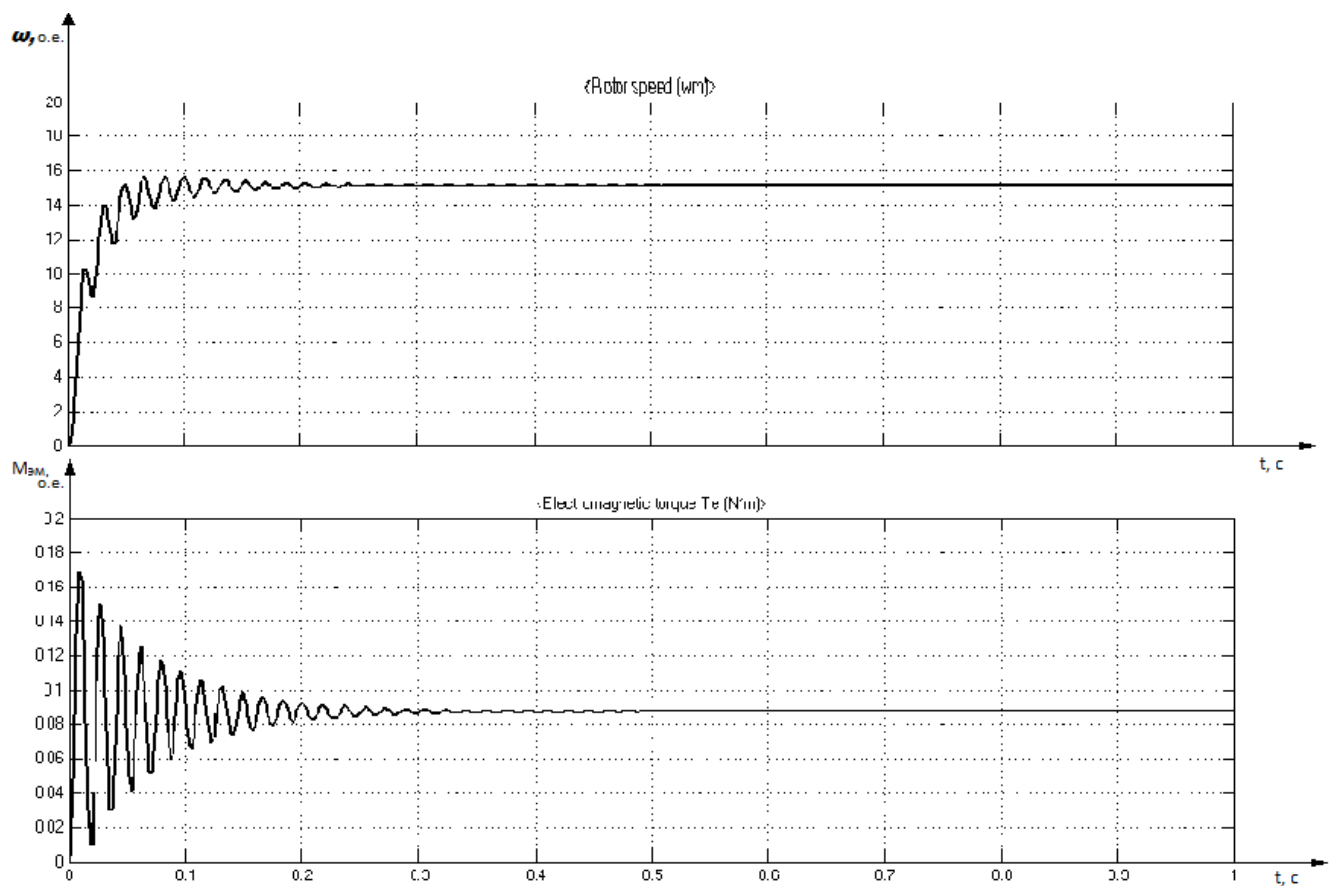


Рисунок 7.2 Временные характеристики АД в режиме холостого хода

При работе на номинальную нагрузку:

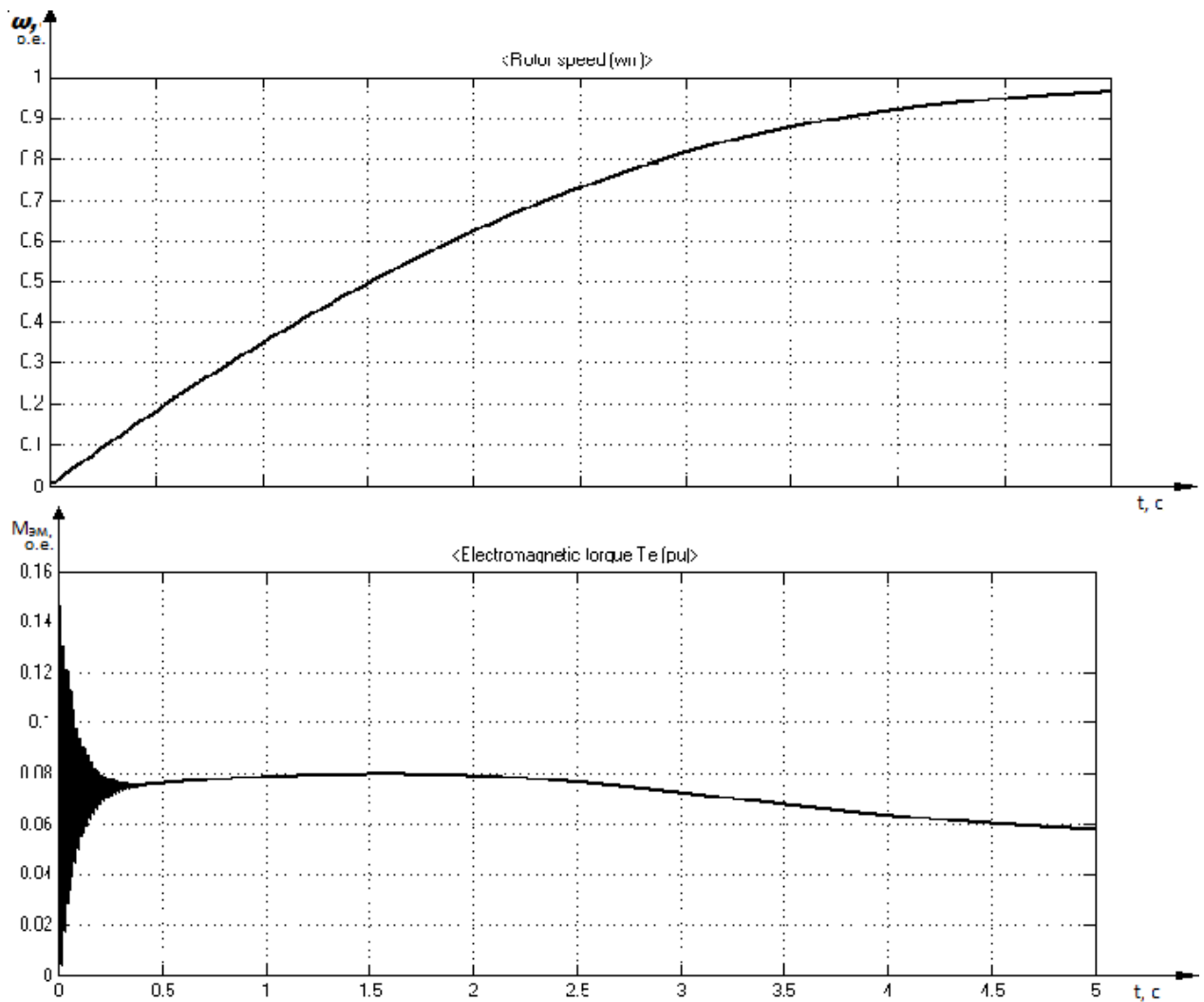


Рисунок 7.3 Временные характеристики АД в режиме номинальной нагрузки

Необходимо отметить, что в начальный момент времени наблюдаются значительные колебания момента. При работе на нагрузку наблюдается уменьшение скорости.

Дополнительная проверка была выполнена математическим описанием АД через систему дифференциальных уравнений. Уравнения АД выраженные через токи и потокосцепления, позволяют определять характер изменения токов, потокосцепления и электромагнитного момента.

Такая форма может быть представлена в следующем виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{\alpha}}{dt} = U_{\alpha} - r_s i_{\alpha} \\ \frac{d\Psi_{\beta}}{dt} = U_{\beta} - r_s i_{\beta} \\ \frac{d\Psi_{\alpha r}}{dt} = w_r \Psi_{\beta r} - r_r i_{\alpha r} \\ \frac{d\Psi_{\beta r}}{dt} = w_r \Psi_{\alpha r} - r_r i_{\beta r} \\ i_{\alpha} = \frac{\Psi_{\alpha}}{\sigma X_s} - \frac{X_m}{\sigma X_s X_{\sigma r}} \Psi_{\alpha r} \\ i_{\beta} = \frac{\Psi_{\beta}}{\sigma X_s} - \frac{X_m}{\sigma X_s X_r} \Psi_{\beta r} \\ i_{\alpha r} = \frac{\Psi_{\alpha r}}{\sigma X_r} - \frac{X_m}{\sigma X_s X_r} \Psi_{\alpha} \\ i_{\beta r} = \frac{\Psi_{\beta r}}{\sigma X_r} - \frac{X_m}{\sigma X_s X_{\sigma r}} \Psi_{\beta} \\ \frac{dw_r}{dt} = (M_{\mathfrak{M}} - M_{Mex}) / J \\ M_{\mathfrak{M}} = \frac{3}{2} X_m (i_{\alpha r} i_{\beta} - i_{\alpha} i_{\beta r}) \end{array} \right.$$

где $\Psi_{\alpha,\beta}(\Psi_{\alpha r,\beta r})$ – полное потокосцепление по α и β осям статора (ротора);

$i_{\alpha,\beta}(i_{\alpha r,\beta r})$ – ток по α и β осям статора (ротора);

$r_s(r_r)$ – сопротивление фазы статора(ротора);

$U_{\alpha}(U_{\beta})$ – по α и β осям;

w_r – угловая скорость вращения ротора;

σ – полный коэффициент рассеяния, определяемый

выражением: $\sigma = 1 - \frac{X_m^2}{X_s X_r}$.

Для этого была написана программа в MatLab, листинг (Приложение Е).

В результате исследования электромеханических параметров двигателя - динамических характеристик, было установлено: время разгона асинхронной машины без нагрузки происходит за 0,2 секунды, а при номинальной нагрузке на валу, время разгона увеличивается до 0,5 секунд.

График электромагнитного момента под нагрузкой рисунок 7.4.

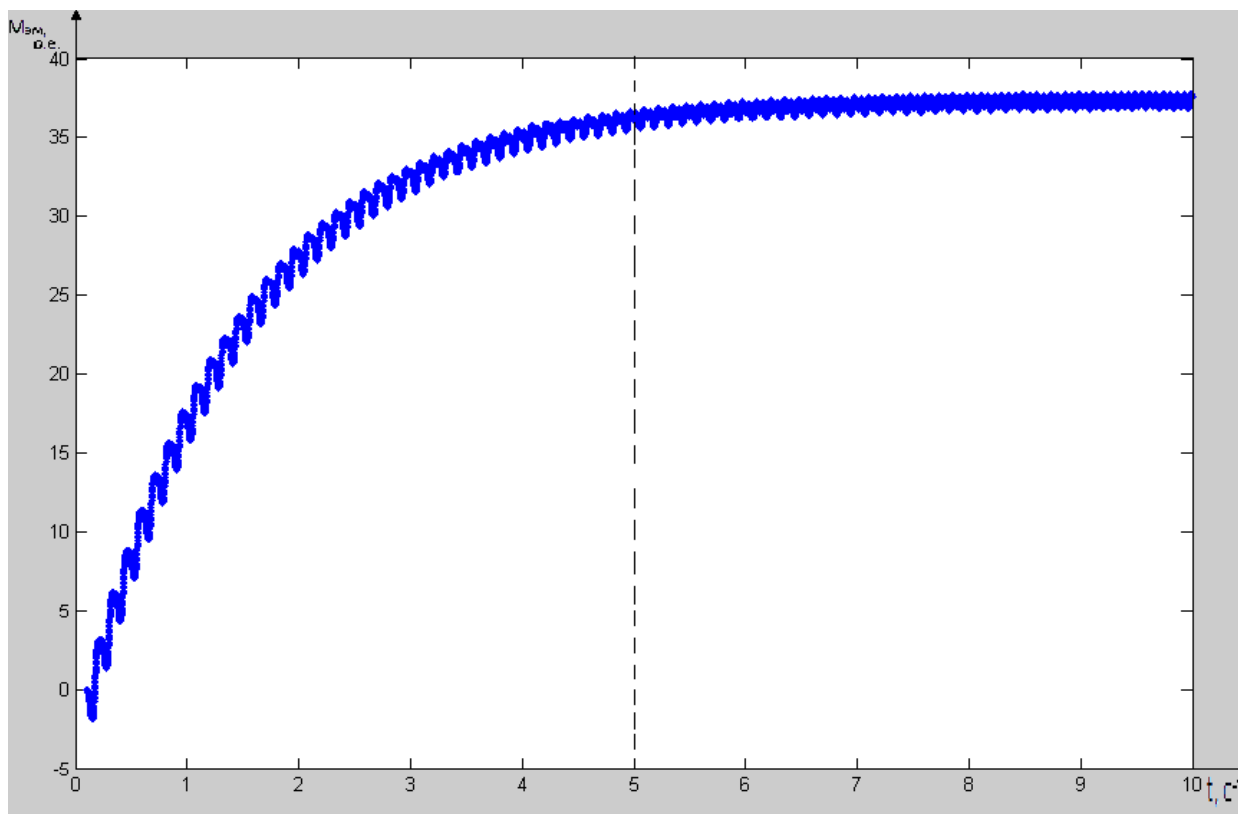


Рисунок 7.4 График электромагнитного момента

Для работы электромеханического привода вакуумного вентиля установлены технические требования по времени открывания или закрывания: не более 7 секунд.

Таким образом, сравнив полученные результаты с техническими данными электромеханического привода, спроектированный двигатель соответствует требуемым параметрам.

8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

8.1 Введение

Целью данного раздела является проведение технико - экономического обоснования целесообразности и необходимости разработки нового проекта и расчет сметы затрат на проведение научно - исследовательской работы.

Главной задачей технико - экономического обоснования является оценка технического уровня создаваемого изделия, выявления потребностей потенциальных покупателей и выбор наиболее эффективного технического решения путем сравнения с существующим лучшим аналогом технических и экономических показателей (свойств материалов, технических параметров, возможностей методов и т.д.), необходимость которых предопределяет его конкурентоспособность по отношению к изделию - аналогу другого производителя.

Конкурентоспособность электродвигателя - это ряд характеристик изделия, определяющих его продажу и потребление, отличных от аналогов по степени удовлетворения потребностей потребителя, по величине затрат на его приобретение и эксплуатацию.

8.2 Определение себестоимости проекта

Себестоимость разрабатываемого проекта рассчитывается, как сумма всех затрат предприятия на производство продукции и ее реализации.

8.2.1 Составим смету затрат и определим затраты на разработку проекта по выражению:

$$\sum I_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам}} + 3П + I_{\text{соц}} + I_{\text{пр}} + I_{\text{накл}}, \quad (8.1)$$

где $I_{\text{мат}}$ - материальные затраты;

$I_{\text{ам}}$ - амортизация основных фондов;

$ЗП$ - заработная плата;

$I_{соц}$ - отчисления на социальные нужды;

$I_{пр}$ - прочие постоянные расходы;

$I_{накл}$ - накладные расходы.

Смету затрат приведем в виде таблицы 8.1 и сведем в таблицу результаты расчетов.

Таблица 8.1 Смета затрат на разработку проекта

№ п/п	Наименование расходов	Обозначение	Сумма, руб.
1.	Материальные затраты	$I_{мат}$	1000
2.	Амортизация основных фондов	$I_{ам}$	479
3.	Заработная плата	$ЗП$	41823
4.	Социальные отчисления	$I_{соц}$	12547
5.	Прочие постоянные расходы	$I_{пр}$	5585
6.	Накладные	$I_{накл}$	83646
7.	Итого себестоимость проекта	$\sum I_{проекта}$	145080

Проведем расчеты:

8.2.2 Затраты на материалы – это расходы на канцелярские товары. Учитывая условия цен в настоящее время, примем в размере 1000 рублей.

$$I_{мат} = 1000 \text{ (руб.)}$$

8.2.3 Рассчитаем затраты на амортизацию основных фондов (оборудования). При разработке проекта основной объем работы был выполнен на персональном компьютере (ПК) первоначальной стоимостью 25 тысяч рублей, время использования компьютера при проектировании примем 35 дней, срок службы компьютера примем пять лет.

Амортизация (ПК):

$$I_{ам} = \frac{T_{исп.к.}}{T_{к}} \cdot Ц_{ПК} \cdot \frac{1}{T_{сл}} = \frac{35}{365} \cdot 25000 \cdot \frac{1}{5} = 479 \text{ (руб.)}, \quad (8.2)$$

где $T_{исп.к.}$ - количество дней отработанных на компьютере;

$T_{к}$ - количество календарных дней в году;

$Ц_{ПК}$ - первоначальная стоимость компьютера;

$T_{сл.}$ - срок полной амортизации.

8.2.4 Для определения заработной платы составим план выполнения работы с поэтапным перечнем работ, с распределением каждого этапа работы между работниками и определим количество времени, затраченного на разработку проекта, данные сведем в таблицу 8.2.

В работе по проектированию асинхронного электродвигателя малой мощности для систем автоматики принимали участие два инженерных работника: научный руководитель (НР) в должности ассистент и инженер (И).

Таблица 8.2 План выполнения проекта.

№ п/п	Наименование работ	Исполнители		Разряд	Время на выполнение работы (дней)
		Количество человек	Должность		
1.	Получение технического задания на разработку проекта	2	НР	14	1
			И	10	
2.	Сбор исходных данных	1	И	10	5
3.	Ознакомление с технической документацией	1	И	10	4
4.	Электромагнитный и механический расчет двигателя	1	И	10	5
5.	Проектирование технологического процесса	1	И	10	5
6.	Специальные расчеты и исследования	1	И	10	3
7.	Выполнение чертежей, схем	1	И	10	4
8.	Проверка выполненных расчетов	2	НР	14	1
			И	10	
9.	Расчет раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	1	И	10	4
10.	Разработка раздела «Социальная ответственность»	1	И	10	4
11.	Оформление проекта	1	И	10	2
12.	Окончательная проверка проекта	2	НР	14	1
			И	10	
Занятость исполнителей			НР	14	3
			И	10	39
Длительность работы					39

8.2.5 Рассчитаем затраты на оплату труда исходя из количества времени, затраченного на выполнение проекта, количества исполнителей, занятых в работе по проектированию, средней заработной платы с учетом доплат: за

условия проживания (районный коэффициент для Томска $K_{\pi} = 30\%$) [15, с. 27], за неотработанное время (отпуск 10 %), доплаты за интенсивность труда. Расчеты сведем в таблицу 8.3.

Таблица 8.3. Расчет заработной платы

Должность	Оклад, руб.	Доплата, руб.	Коэффициент за отпуск, руб.	Районный коэффициент, руб.	Заработная плата за месяц, руб.	Средняя заработная плата за день, руб.	Количество рабочих дней	Фактическая заработная плата (ФЗП), руб.
Научный руководитель	14500	1900	1,1	1,3	23205	1105	3	3315
Инженер	14500	-	1,1	1,3	20735	987	39	38508
ИТОГО					43940	2092		41823

8.2.6 Заработная плата исполнителей проекта за месяц [15, с. 27, формула 23]:

$$И_{ЗП} = (ЗП_{\text{т}} \cdot k_1 + ЗП_{\text{д}}) \cdot k_2, \quad (8.3)$$

где $ЗП_{\text{т}}$ – тарифный фонд заработной платы (оклад),

k_1 – коэффициент за отпуск (1,1),

$ЗП_{\text{д}}$ – доплата за интенсивность труда,

k_2 – районный коэффициент (1,3).

Для научного руководителя:

$$И_{ЗП_{\text{н.р.}}} = (14500 \cdot 1,1 + 1900) \cdot 1,3 = 23205 \text{ (руб.)}$$

Для инженера:

$$И_{ЗП_{\text{инж}}} = 14500 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 20735 \text{ (руб.)}$$

8.2.7 Рассчитаем фактическую заработную плату (ФЗП) исполнителей, исходя из времени, затраченного на выполнение проекта по формуле:

$$И_{ЗП}^{\text{ф}} = \frac{И_{ЗП}^{\text{мес}}}{21} \cdot n, \quad (8.4)$$

где $И_{ЗП}^{\text{мес}}$ – заработная плата за месяц,

n – количество рабочих дней, затраченных на проект,

21 – количество рабочих дней в месяце.

Для научного руководителя:

$$И_{ЗП_{\text{н.р.}}}^{\text{ф}} = \frac{23205}{21} \cdot 3 = 3315 \text{ (руб.)}$$

Для инженера:

$$И_{3П\text{ инж.}}^{\Phi} = \frac{20735}{21} \cdot 39 = 38508 \text{ (руб.)}$$

8.2.8 Итого затраты на оплату труда составят:

$$ЗП = \Sigma И_{3П}^{\Phi} = 3315 + 38508 = 41823 \text{ (руб.)} \quad (8.5)$$

8.2.9 Затраты на социальные нужды - это обязательные отчисления, которые закладываются по установленным законодательством нормам, в размере 30% от фактической заработной платы (ФЗП) [15, с. 25]:

$$И_{соц} = 0,3 \cdot ЗП = 0,3 \cdot 41823 = 12547 \text{ (руб.)} \quad (8.6)$$

8.2.10 Рассчитаем прочие постоянные расходы.

Прочие неучтенные прямые затраты включают в себя все расходы связанные с налоговыми сборами (не предусмотренными в предыдущих статьях), отчисления внебюджетные фонды, оплата услуг связи, платежи по страхованию, затраты на ремонт, представительские расходы и прочее. Принимаем размер прочих затрат как 10% от суммы расходов на материальные затраты, амортизацию оборудования, затрат на оплату труда, отчисления на социальные нужды.

$$И_{пр} = 0,1 \cdot (И_{мат} + И_{ам} + ЗП + И_{соц}), \quad (8.7)$$

$$И_{пр} = 0,1 \cdot (1000 + 479 + 41823 + 12547) = 5585 \text{ (руб.)}$$

8.2.11 Рассчитаем накладные расходы.

Накладные расходы составят 200% от ФЗП - это затраты на хозяйственное обслуживание помещения, обеспечение нормальных условий труда, оплату за энергоносители и другие косвенные затраты.

$$И_{накл} = 2 \cdot ЗП = 2 \cdot 41823 = 83646 \text{ (руб.)} \quad (8.8)$$

8.2.12 Рассчитаем себестоимость проекта по формуле 8.1:

$$\Sigma И_{\text{проекта}} = 41823 + 12547 + 1000 + 479 + 5585 + 83646 = 145080 \text{ (руб.)}$$

Вывод:

Таким образом, себестоимость проекта составит 145,08 тыс. рублей.

8.3 Оценка технического уровня

Основными критериями, определяющими конкурентоспособность изделия на рынке сбыта, являются:

- технический уровень изделия, характеризующий техническое совершенство оцениваемого изделия по сравнению с изделиями - конкурентами;
- уровень качества изделия в эксплуатации или потреблении;
- уровень затрат потребителя на приобретение изделия, налоги, транспортирование, оплата запчастей, монтаж, наладка, ремонт изделия и т.п.

Для оценки научно - технического эффекта от внедрения разработки проводят количественный и качественный анализ конкурентоспособности преимуществ и недостатков инженерных решений.

8.3.1 Проведем количественный анализ конкурентоспособности по следующей схеме [15, с. 7]:

- 1) выберем базовый образец, аналогичный по назначению и условиям эксплуатации с оцениваемым образцом;
- 2) определим перечень параметров, подлежащих исследованию;
- 3) сравним каждую из групп параметров новшества, необходимыми для заказчика (потребителя) с соответствующими параметрами конкурента. Отношением величины параметра рассматриваемого изделия к величине этого же параметра инструментом для сравнения является единичный показатель;
- 4) подсчитаем групповой показатель, показывающий различие между анализируемыми изделиями по всем параметрам в целом, на основе единичных показателей.

Проведение такой схемы анализа на предельности отдельных элементов потребности, проводится для того, чтобы не делался вывод о большей конкурентоспособности анализируемого изделия с более высокими, чем у образца аналогичными параметрами при придании количественной оценки тем параметрам, которые не имеют естественной физической меры (например,

комфортность изделия), а использовании экспертных методов; необходимых в построении весовой базы для технических параметров на основе рыночных исследований.

Проектирование новых изделий должно начинаться с выявления потребностей потенциальных покупателей.

8.3.2 Произведем ранжирование по степени проявления характеристик потребительского отношения к конкретному изделию, это позволит ввести в модель переменную величину, отражающую доминирование одного аспекта восприятия над другим – вес показателя.

Самые важные характеристики или качества изделия будут оцениваться в 1,5 балла, менее важное – 1 балл, и 0,5 балла получит третье по значению. Таким образом, появится набор оцененных характеристик изделия и взвешенных аспектов восприятия изделия потребителем.

Данные для оценки и расчетов технического уровня разрабатываемого новшества приведем в таблице 8.4.

Таблица 8.4 - Оценка технического уровня новшества.

№ п/п	Наименование характеристики	Вес показатель.	Новшество		Конкурент		Гипотетическ ий образец	
		d_i	P_i	q_i	P_i	D_i	P_{100}	q_{100}
1	Коэффициент полезного действия (КПД), %	0,142	0,66	0,943	0,6	0,857	0,7	1
2	Коэффициент мощности (cosφ)	0,134	0,74	0,925	0,7	0,875	0,8	1
3	Пусковой ток, А	0,112	3,68	0,995	3,5	0,946	3,7	1
4	Пусковой момент, Н · м	0,157	2,52	0,9	2,0	0,714	2,8	1
5	Номинальный ток, А	0,112	0,28	0,933	0,325	0,917	0,3	1
6	Частота вращения, об/мин	0,119	2900	0,967	2800	0,929	3000	1
7	Динамический момент, кг·мм ²	0,157	110	0,846	93	0,715	130	1
8	Уровень шума, дБА	0,067	60	0,966	68	0,828	58	1
Полезный эффект товара (интегральный показатель качества), Q				0,928		0,852		1

8.3.3 Составим матрицу потребительских предпочтений.

Таблица 8.5- Матрица потребительских предпочтений

№ п/п	Наименование характеристики	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	Σa_{ij}	d_{ij}
1.1	Коэффициент полезного действия (КПД), %	1,5	1	1	1	1	1	1,5	1,5	9,5	0,142
1.2	Коэффициент мощности (cosφ)	1,5	1	1	1	1	1	1	1,5	9	0,134
1.3	Пусковой ток, А	1,5	1	1	1	0,5	0,5	0,5	1,5	7,5	0,112
1.4	Пусковой момент, Н · м	1,5	1	1	1,5	1	1,5	1,5	1,5	10,5	0,157
1.5	Номинальный ток, А	0,5	1	1	1,5	0,5	1	0,5	1,5	7,5	0,112
1.6	Частота вращения, об/мин	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	1	1,5	8	0,119
1.7	Динамический момент, кг · м ²	1,5	1	1	1,5	1	1,5	1,5	1,5	10,5	0,157
1.8	Уровень шума, дБА	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	4,5	0,067
	Сумма $\Sigma \Sigma a_{ij}$									67	1

8.3.4 Рассчитаем весовой показатель для каждой характеристики, результаты расчетов сведем в таблицу 8.5:

$$d_{ij} = \frac{\Sigma a_{ij}}{\Sigma \Sigma a_{ij}}, \quad (8.9)$$

где Σa_{ij} - суммарная оценка по каждой характеристике в баллах,

$\Sigma \Sigma a_{ij}$ - итоговая сумма в баллах по всем характеристикам.

Для п.п.1.1 таблицы 8.5:

$$\Sigma a_{1,1} = 1,5 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1 + 1,5 + 1,5 = 9,5;$$

$$d_{1,1} = \frac{9,5}{67} = 0,142$$

8.3.5 Вычислим единичный параметрический показатель [15, с. 7, формула 2]:

$$q = \frac{P}{P_{100}} \cdot p, \quad (8.10)$$

где q - параметрический показатель;

P - величина параметра реального изделия;

P_{100} - величина параметра гипотетического изделия, удовлетворяющего потребности на 100%;

p - вероятность достижения величины параметра.

Для п.п.1 таблицы 8.4:

$$q_{H1} = \frac{0,66}{0,7} = 0,943;$$

$$q_{K1} = \frac{0,6}{0,7} = 0,857$$

8.3.6 Определим обобщенный (групповой показатель), характеризующий соответствие изделия потребности в нем (полезный эффект товара) [15, с. 8, формула 3]:

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i \cdot d_i, \quad (8.11)$$

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.

$$\begin{aligned} Q_H &= 0,943 \cdot 0,142 + 0,925 \cdot 0,134 + 0,995 \cdot 0,112 + 0,9 \cdot 0,157 + \\ &+ 0,933 \cdot 0,112 + 0,967 \cdot 0,119 + 0,846 \cdot 0,157 + 0,966 \cdot 0,067 = 0,928; \\ Q_K &= 0,957 \cdot 0,142 + 0,875 \cdot 0,134 + 0,946 \cdot 0,112 + 0,714 \cdot 0,157 + \\ &+ 0,917 \cdot 0,112 + 0,929 \cdot 0,119 + 0,715 \cdot 0,157 + 0,828 \cdot 0,067 = 0,852 \end{aligned}$$

8.3.7 Коэффициент технического уровня [15, с.8, формула 4]:

$$K_{\text{ТУ}} = \frac{Q_H}{Q_K} = \frac{0,928}{0,852} = 1,09 \quad (8.12)$$

где Q_H , Q_K - групповые технические показатели нового и конкурирующего изделия.

Вывод:

По нашим расчетам оценки конкурентоспособности нового изделия видно, что разработанный двигатель не уступает изделиям заменителям и по техническим показателям превосходит конкурентов, т.к. обобщенный (групповой показатель), характеризующий соответствие изделия потребности в нем (полезный эффект товара) новшества больше, чем у конкурента ($Q_H > Q_K$). Коэффициент технического уровня равен 1,09.

Таким образом, данный проект экономически целесообразен.

9. Социальная ответственность

9.1 Введение

В современных условиях развития производства особо важным для перспективной деятельности предприятия является его социальная политика внутренняя и внешняя, направленная на улучшение качества жизни работников.

Основными аспектами «социальной ответственности», согласно международного стандарта IC CSR 26000:2011 «Социальная ответственность организации» являются вопросы по выполнению требований, относящихся к производству продукции и оказанию услуг надлежащего качества, удовлетворении интересов потребителей, соблюдении прав персонала на труд, выполнении требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности и охране окружающей среды, ресурсосбережению, участию в социальных мероприятиях и поддержке инициатив местного сообщества, добросовестного ведения бизнеса. А так же стабильность заработной платы, дополнительное медицинское и социальное страхование сотрудников, оказание помощи работникам в критических ситуациях.

Социальная ответственность предприятия – это уровень добровольного отклика на социальные потребности работников, лежащие вне определяемых законом или регулируемыми органами требований, это действия, предпринимаемые во благо общества добровольно.

Целью данной работы является: дать характеристику работ, рабочей зоны, рабочего места, характер воздействия разработанных решений с точки зрения социальной ответственности в области безопасности для работников, общества и окружающей среды, разработке комплекса мероприятий технического, организационного, режимного и правового характера, минимизирующих негативные последствия проектируемой деятельности.

9.2 Техногенная безопасность

Производственная среда это совокупность физических, химических, биологических и социальных факторов, воздействующих на человека в процессе его трудовой деятельности, где основными травмоопасными и вредными факторами являются машины и другие технические устройства, химически и биологически активные объекты трудовой деятельности, источники энергии, нарушения регламентов работ, а также отклонения от температурных режимов рабочей зоны.

Проанализируем производственную среду и трудовой процесс для общей сборки асинхронного двигателя.

Общая сборка электродвигателя включает в себя следующие виды работ: с ручным механизированным инструментом (по роду используемой энергии может быть электрическим, пневматическим, гидравлическим), сборочные приспособления - зажимы, служащие для закрепления собираемого изделия), установочные, предназначенные для правильной и точной установки соединяемых деталей, прессы гидравлические с различной силой давления (для запрессовки деталей), работа с легко воспламеняющимися жидкостями (ЛВЖ) и химическими веществами (бензин, масла, - для промывки и смазки подшипников, пропиточные лаки, покровные эмали), нагревательная ванна, работа с транспортными приспособлениями, с измерительными приборами, универсальные установки для проведения испытаний основных параметров собранной машины (стенд для проверки электрооборудования).

Планировка рабочих мест в цехе должно соответствовать последовательности выполнения сборочного процесса, что обеспечит наиболее короткий путь перемещения деталей и сборочных единиц. Оптимально разместить рабочие места необходимо в следующем порядке:

- 1) Слесарная обработка деталей (в случаях, когда она необходима);
- 2) Сборка подузлов и узлов;
- 3) Общая сборка машины;

- 4) Регулировка и обкатка машины;
- 5) Испытание машины;
- 6) Окраска и консервация машины.

Согласно приведенному перечню выполняемых работ располагают сборочное оборудование:

- верстаки для слесарной обработки;
- верстаки, столы, рольганги, конвейеры и специальные устройства для сборки узлов, подузлов, агрегатов машины;
- специальные стенды, рельсовые и безрельсовые тележки, рельсовые пути, карусельные столы для общей сборки машины.

Слесарные столы располагаются, что бы гарантировать проход, минимальной ширины 1,5 метра. В случае необходимости движения транспорта его ширина устанавливается в зависимости от габаритов применяемых транспортных средств. Сборочные места для сборщиков планируются так, чтобы обеспечить свободное перемещение рабочих вокруг собираемой машины. Для размещения деталей используются специальные стеллажи, подставки, ящики, обеспечивающие бесперебойную сборку машины.

9.2.1 Проведем анализ на предмет выявления вредных факторов.

Воздействие на работника, в определенных условиях вредных производственных факторов приводит к заболеваниям или снижению трудоспособности.

На участке общей сборки асинхронного двигателя возникают вредные факторы.

- отклонение параметров микроклимата от установленных норм
- шум, при работе оборудования
- вибрация, при работе оборудования
- производственное освещение
- электромагнитные излучения

1) производственные метеоусловия – это отклонение параметров микроклимата в рабочей зоне от установленных норм.

Рабочая зона это пространство, высотой до 2-х метров над уровнем пола или площадки, на которых находятся места постоянного или временного пребывания работающих (более 2-х часов непрерывно).

Гигиенические требования к показателям микроклимата рабочих мест производственных помещений устанавливают санитарные правила СанПиН 2.2.4.548-96.

Микроклимат на рабочем месте характеризуется: температурой, относительной влажностью, скоростью движения воздуха на рабочем месте, интенсивностью теплового излучения, барометрическим давлением (не нормируется)

В соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 нормируемые параметры микроклимата подразделяются на оптимальные и допустимые метеорологические условия для рабочей зоны помещения.

Работа относится к средней тяжести – Па.

Значения перечисленных параметров непосредственно к проектируемому участку согласно СанПиН 2.2.4.548-96 приведены в таблице 9.1.

Таблице 9.1 – Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах производственных помещений

Параметр величины		Сезон года	
		Холодный	Тёплый
Температура воздуха, °С	диапазон ниже оптимальных	17-18,9	18-19,9
	оптимальные	19-21	20-22
	диапазон выше оптимальных	21 - 23	22 - 27
Температура поверхностей, °С	отклонение от оптимальных	16-24	17-28
	оптимальные	18-22	19-23
Относительная влажность, %	отклонение от оптимальных	15-75	15-75
	оптимальные	60-40	60-40
Скорость движения воздуха, м/с	для диапазона температур воздуха ниже оптимальных, не более	0,1	0,1
	оптимальные (меньше или равно)	0,2	0,2
	для диапазона температур воздуха выше оптимальных, не более	0,3	0,5

Нормирование теплового инфракрасного излучения (ИК).

Нормирование теплового излучения в производственных условиях регламентируется в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 12.1.005-88. «Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования в области рабочей зоны» и Санитарных правил и норм СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».

Нормирование ИК - излучения осуществляется по интенсивности допустимых интегральных потоков излучения с учетом спектрального состава, размера облучаемой площади, защитных свойств спецодежды для продолжительности действия более 50% смены. Интегральная допустимая интенсивность теплового облучения не должна превышать 258 Вт/м^2 .

Для оценки сочетанного воздействия параметров микроклимата в целях осуществления мероприятий по защите работающих от возможного перегревания рекомендуется использовать интегральный показатель тепловой нагрузки среды.

Тепловая нагрузка среды (ТНС) - сочетанное действие на организм человека параметров микроклимата (температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое облучение), выраженное одночисловым показателем в градусах Цельсия. Значения ТНС-индекса не должны выходить за пределы величин, рекомендуемых ниже таблице 9.2 согласно СанПиН 2.2.4.548-96.

Таблица 9.2

Категория работ по уровню энергозатрат, Дж/с	Легкая Ia (до 148)	Легкая Ib (150.. 174)	Средней тяжести Pa (174.. 232)	Средней тяжести Pb (233.. 290)	Тяжелая III (свыше 290)
Величина интегрального показателя, °C	22,2.. 26,4	21,5.. 25,8	20,5.. 25,1	19,5...23,9	18,0.. 21,8

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих на рабочих местах от производственных источников, нагретых до темного свечения (материалов, изделий и др.), должны соответствовать значениям, приведенным ниже.

Допустимые величины интенсивности теплового облучения работающих от источников излучения, нагретых до белого и красного свечения (раскаленный или расплавленный металл, стекло, пламя и др.), не должны превышать 140 Вт/м^2 . При этом облучению не должно подвергаться более 25% поверхности тела и обязательным является использование средств индивидуальной защиты, в том числе средств защиты лица и глаз.

По Санитарным правилам и нормам СанПиН 2.2.4.548-96 температура наружных поверхностей технологического оборудования и ограждений на рабочем месте не должна превышать 45°C .

Таблица 9.3

Облучаемая поверхность тела, %	50 и более	25...50	Не более 50
Интенсивность теплового облучения, Вт/м^2 , не более	35	70	100

2) Вредные вещества

Поражения отравляющими веществами возможны при использовании в работе химических веществ. Основные пути попадания отравляющих веществ (ОВ) в организм: через дыхательные пути, кожные покровы и желудочно-кишечный тракт. Токсичность ОВ - это способность вызывать отравления при попадании в организм в определенных дозах. Количественная характеристика поражающего действия ОВ - токсическая доза, при вдыхании выражается в $\text{мг}\cdot\text{мин/л}$ воздуха, при проникновении через кожу, желудочно-кишечный тракт мг/кг живой массы.

ОВ делятся по характеру поражающего действия на: нервно-паралитические, общеядовитые, удушающие, кожно-нарывные, раздражающие и психогенные.

Предельно допустимой концентрацией (ПДК) называется такая концентрация, которая при ежедневной работе в течение 8 ч. на протяжении всего рабочего стажа не могут вызвать у работающих заболеваний или отклонения в состоянии здоровья.

ПДК является и характеристикой опасности веществ и устанавливается в мг/м на основе исследований и утверждается Минздравом РФ

В цехе на сборочном участке используются вещества, которые оказывают вредное влияние на организм человека. Санитарными нормами установлены предельно - допустимые концентрации вредных примесей в воздухе. Одно из веществ - хромовый ангидрид, его ПДК = 0,01 мг/м³, класс опасности - 1; марганец, его ПДК = 0,1 мг/м³, класс опасности 2, также образуется пыль, её ПДК = 6,0 мг/м³, класс опасности 4.

Контролем содержания вредных примесей в воздухе и на рабочих местах занимается санитарная лаборатория.

Чтобы устранить вредное воздействие на здоровье работающих вредных испарений необходимо установить в цехе систему вентиляции, поддерживающую необходимую атмосферу в рабочем помещении. Для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры

3) виброакустические поля

Шум, вибрация и ультразвук представляют собой колебания материальных частиц газа, жидкости или твердого тела. Производственные процессы часто сопровождаются значительным шумом, вибрацией и сотрясениями, которые отрицательно влияют на здоровье и могут вызвать профессиональные заболевания.

Воздействие вибрации и шума происходит при работе с ручным механизированным инструментом. Эквивалентный уровень шумов в помещении участка 80Дб (устанавливается в соответствии с ГОСТ 12.1.003-76).

С физиологической точки зрения шум рассматривается как звуковой процесс неблагоприятный для восприятия, мешающий разговорной речи и отрицательно влияющий на здоровье человека: сердечно - сосудистую систему; нервную систему; органы слуха (барабанная перепонка). Кроме того, шум вызывает повышенную раздражимость и нервозность.

Нормирование шума осуществляется в соответствии с ГОСТ 12.1.003-83. Учитываются: вид работы, характеристика шума (монотонный,

импульсный, постоянный или непостоянный), его продолжительность воздействия, источник шума.

Нормирование осуществляется двумя методами:

- 1) по спектральному составу, т.е. нормирование по октавным составляющим. Для постоянных шумов.
- 2) нормирование эквивалентного шума – в основном для непостоянных шумов.

По 2 методу дополнительный уровень звука на рабочих местах устанавливается по общему уровню звука, определенного по шкале А шумометра, т.е. на частоте 1000 Гц.

В таблице 9.4 приведены уровни звукового давления, измеренные в цеху в восьми октавных полосах со среднегеометрическими частотами.

Таблица 9.4 – Уровни звукового давления

Рабочие места	Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами.								Уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Постоянные рабочие места и рабочие зоны в производственных помещениях и на территории предприятий	99	92	86	83	80	78	76	74	80

При работе с оборудованием, работающий подвергается воздействию вибрации. Для защиты рук от воздействия вибрации применяют: рукавицы, перчатки, а также виброзащитные прокладки или пластины, которые снабжены креплениями в руке. Если уровень шума не снижается в пределах нормы, используются индивидуальные средства защиты (наушники, шлемофоны).

Общие технические требования к средствам индивидуальной защиты рук от вибраций определены ГОСТ 124002-74.

Снижение уровня шума достигается путем своевременного устранения неисправности технологического оборудования. Для защиты окружающей среды от шума используются лесные насаждения.

Для работающих в качестве профилактики предусмотрен специальный режим труда: суммарное время работы в контакте с вибрацией не должно превышать 2/3 рабочей смены.

Приборы контроля: шумомеры; виброакустический комплекс - RFT, ВШВ.

Вибрация может быть причиной расстройства сердечно - сосудистой и нервной системы, а так же опорно-двигательной системы человека. Систематическое воздействие общих вибраций может приводить к виброболезни, которая характеризуется нарушением физиологических функций организма, связанными с поражением ЦНС.

Ее измерение производится прибором ВШВ-003, снабженным датчиком вибрации.

Таблица 9.5 Предельно допустимые значения производственной локальной вибрации согласно СН 2.2.4/2.1.8.566-96

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Предельно допустимые значения по осям X_L , Y_L , Z_L			
	виброускорения		виброскорости	
	м/с ²	дБ	м/с · 10 ⁻²	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,8	129	1,4	109
63	5,6	235	1,4	109
125	11,0	141	1,4	109
250	22,0	147	1,4	109
500	45,0	153	1,4	109
1000	89,0	159	1,4	109
Корректированные и эквивалентные корректированные значения и их уровни	2,0	126	2,0	112

Наиболее опасны для организма вертикальные вибрации и местные вибрации.

Ручные машины, вибрация которых имеет максимальные уровни энергии в низких частотах (до 35 Гц), вызывают вибрационную патологию с преимущественным поражением нервно-мышечного и опорно-двигательного аппарата.

Нормирование вибраций проводится в соответствии с ГОСТ 12.1.012-90.

Мероприятия по борьбе с вибрацией:

- 1) организационные (организация работы и СИЗ);
- 2) инженерно-технические мероприятия (уменьшение вибрации в самом источнике их возникновения);
- 3) лечебно-профилактические.

Вибробезопасность машин (механизмов) достигается: виброизоляцией их по ГОСТ 12.4.046-78 за счет установки на фундаменты, виброизолированные от пола специальные амортизаторы (прокладки из войлока, резины, пружины т.п; балансировкой вращающихся частей; применением виброизолирующих мастик и др.)

Организационно-технические меры включают: проведение проверок вибрации не реже 1 раза в год при общей вибрации и двух раз в год при локальной вибрации, а также после ремонта машин; и при начале их эксплуатации; исключение контакта работающих с вибрирующими поверхностями за пределами рабочего места или зоны (ограждения, знаки, надписи), введение определенного режима работ, недопущение к работе лиц, моложе 18 лет и не прошедших медосмотр, проведение повторного ежегодного медосмотра.

4) производственное освещение

Недостаточная освещенность рабочей зоны. Освещение рабочих мест должно отвечать условиям и характеру работы и должно быть оптимальным по величине. Недостаточная освещенность снижает остроту зрения. С увеличением освещенности острота зрения достигает максимума при 75 Лк. А быстрота различения предметов при 1000-1200 Лк. Чрезмерная высокая освещенность, так же как и недостаточная, вызывает быстрое утомление глаз, снижение видимости.

Система освещения в цехе должна включать в себя общее и местное освещение. Величина минимальной освещенности должна составлять 400 лк.

Правильно спроектированное и выполненное освещение на предприятиях машиностроительной промышленности, обеспечивает возможность нормальной производственной деятельности.

Задачи расчета искусственного освещения является определение числа светильников, их типа, мощности источников света.

Важной задачей на производстве, является создание наилучших условий для видения. Эту задачу можно решить только осветительной системой. В этих нормах рекомендуется освещённость участков, содержащих нужное оборудование, должна быть не менее 200 лм.

К числу источников света массового применения относятся лампы накаливания, лампы ДРЛ, люминесцентные лампы.

Основным источником света, как для общего, так и для комбинированного освещения, являются люминесцентные лампы: АД4, ЛД, ЛХБ, ЛБ, ЛТБ. Из них наиболее экономичными являются лампы типа ЛБ.

Применение на рабочих местах одного местного 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 применяется 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 так же в помещениях с не высокой плотностью распределения рабочих мест.

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 и потолками. Метод коэффициента использования применяется только при расчете общего равномерного освещения.

Величина светового потока лампы:

$$F = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot Z}{N \cdot \eta}, \quad (9.1)$$

где E - минимальная освещённость, лк.;

k - коэффициент запаса;

S - площадь помещения, м²;

N - число ламп освещения;

η - коэффициент использования светового потока;

Z - коэффициент неравномерности освещения.

Коэффициент использования светового потока

i - - отношение полного светового потока, достигающего освещаемой поверхности, к полному световому потоку в помещении.

Индекс помещения

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{150}{4 \cdot (15 + 10)} = 1.5, \quad (9.2)$$

где коэффициенты отражения:

$f_n = 50\%$ - состояние потолка (чистый бетонный),

$p_0 = 30\%$ - состояние стен (бетонный с окнами)

Коэффициент неравномерности Z введен в формулу светового потока, потому что освещенность, подсчитанная без этого коэффициента, является не минимальной, как требуют нормы, а средней. Введением коэффициента Z это несоответствие устраняется. Для люминесцентных ламп $Z = 0,9$ $E = 200$ лм - минимальная нормативная освещённость, для разряда зрительных работ средней точности.

$\eta = 0,5$ - для ламп типа ПВЛ

$$F = \frac{200 \cdot 1.8 \cdot 150 \cdot 0.9}{2 \cdot 6 \cdot 0.5} = 8100 \text{ лм.}$$

Принимаем в каждом светильнике типа ПВЛ два источника света мощностью по 80 Вт (со световым потоком 4500 лм), которые соответствует отклонениям (-10%, +20%).

В данном случае это условие выполняется, что соответствует норме.

5) электромагнитные излучения (ЭМИ)

На образование ЭМИ используется небольшая часть ядерной энергии, однако он способен вызывать мощные импульсы токов и напряжений в проводах и кабелях линий связи, сигнализации, управления и т.п. Воздействие ЭМИ может привести к сгоранию чувствительных электронных и электрических элементов.

Одним из методов защиты радиоэлектронных систем от воздействия сильного ЭМИ является применение металлических экранов. Они отражают электромагнитные волны и гасят электрочастотную энергию. Через систему заземления ток, наведенный ЭМИ, стекает в землю, не причинив вреда электронной аппаратуре, находящихся внутри металлических шкафов или коробов.

Защита кабелей: наводимое в кабелях под воздействием ЭМИ напряжения зависят от конструкции кабелей, вида нагрузок, конструкции разъемов, качества монтажа кабеля и внешних условий при его эксплуатации.

Соединительные кабели для защиты прокладывают в земляных траншеях под цементным или бетонным полом здания, либо заключают в стальные короба, которые заземляют. Можно размещать кабели и на поверхности пола, закрыв их заземленным швеллером.

Защитные разрядники и плавкие предохранители. Для защиты от ЭМИ широко используются разрядники, устанавливаемые на входы и выходы аппаратуры, в воздушные и подземные линии связи и электроснабжения.

9.2.2 Проведем анализ на предмет выявления *опасных* проявлений факторов рабочей зоны.

Воздействие опасного производственного фактора определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья. К ни относятся: *механическое и термическое травмирование, электробезопасность, пожаровзрывобезопасность*

1) механические и термические травмирования

Для снижения влияния опасных и вредных производственных факторов на работающих в организациях, участках механообработки и сборке, необходимо произвести ряд организационных и технических мер. Для устранения возможности попадания стружки в глаза на станках, где есть такая возможность, необходимо установить защитные заграждения, а там, где установка невозможна по техническим причинам, необходимо выдавать рабочим защитные очки.

2) электробезопасность

Согласно (ПУЭ - 2000) сборочный цех относится к помещениям с повышенной опасностью, так как характеризуются наличием следующих условий, создающих повышенную опасность: токопроводящие полы.

Повышение электробезопасности в установках достигается применением систем защитного заземления, зануления, защитного отключения и методов защиты, таких как предупредительные плакаты и знаки безопасности.

Проблема токопроводящих (железобетонных) полов разрешается оборудованием деревянных плиток на рабочих местах.

Для снижения вероятности поражения работающих электрическим током необходимо принять целый комплекс мер, обеспечивающих достаточную безопасность.

Защита от воздействия электростатических разрядов направлено на устранение причин образования зарядов и достигается следующими мерами:

заземлением производственного оборудования; увеличением электропроводности поверхностей электризующихся тел путем увеличения влажности воздуха; ионизацией воздуха для увеличения его электропроводности; покрывать полы из однослойного поливинилхлоридного антистатического линолеума.

В помещении, где выполняются работы, со статическим электричеством борются путем заземления оборудования.

Основными техническими способами и средствами защиты от поражения электрическим током являются:

- заземление корпусов всех электроустановок через нулевой провод;
- выравнивание потенциалов;
- защитное заземление;
- применение малого напряжения;
- электрическое разделение сетей;
- изоляция токоведущих частей;
- компенсация токов замыкания на землю;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры.

4) Пожарная безопасность (пожаровзрывобезопасность)

Пожары на машиностроительных предприятиях представляют большую опасность для работающих и могут причинить огромный материальный ущерб. Вопросы обеспечения пожарной безопасности производственных зданий и сооружений имеют большое значение и регламентируются специальными государственными постановлениями и указами (ППБ).

Опасными факторами пожара для людей являются: открытый огонь, искры, повышение температуры воздуха и окружающих предметов, токсичные продукты горения, дым, обрушения и повреждения зданий и сооружений, а также возможность взрывов.

Причины пожаров в производственном помещении сборочного цеха могут быть следующими:

- пользование открытым огнем;
- курение в непригодных для этого местах;
- возгорание промасленной использованной ветоши;
- появление искры при авариях в электроустановках (при коротком замыкании).

Для предотвращения пожара необходимо предусмотреть следующие меры:

- предотвращение образования горючей среды;

- предотвращение образования в горючей среде источников воспламенения;
- поддержание температуры и давления горючей среды ниже максимально допустимого по горючести;
- уменьшение определяющего размера горючей среды ниже максимально допустимого по горючести.

Противопожарные меры:

- максимальное, по возможности, применение негорючих и трудно горючих материалов и веществ вместо горючих;
- изоляция горючей среды;
- предотвращение распространения пожара за пределы очага;
- применение средств пожаротушения;
- применение конструкций объектов с регламентированным пределом огнестойкости и горючести;
- эвакуация людей;
- применение средств коллективной и индивидуальной защиты;
- применение средств пожарной сигнализации и средств извещения о пожаре;
- организация пожарной охраны объекта;
- соблюдение противопожарного режима производства.

Производственное помещение цеха по пожарной безопасности относится к категории Д, так как на его территории обрабатываются негорючие материалы в холодном состоянии.

В цехе на заметных местах установлены щиты с противопожарным инвентарем. В непосредственной близости от щита установлен ящик с песком. На участке имеется пожарная сигнализация, оповещающая пожарную службу завода при появлении возгорания. Кроме того, в цехе имеются пожарные краны, оборудованные пожарными рукавами, которые установлены в предназначенных для этого местах (выходы, лестничные площадки).

В случае возникновения очага возгорания эвакуация людей и оборудования производится по специальным эвакуационным путям, обозначенным на планах эвакуации на случай пожара, которые также вывешены в наиболее видных местах. Эвакуационными выходами служат двери и ворота, ведущие из помещения наружу.

Так как помещение цеха по степени пожаровзрывоопасности относится к категории Д, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий технического, эксплуатационного, организационного плана.

К техническим мерам относятся:

- соблюдение пожарных норм при проектировании и сооружении зданий;
- устройство отопления и вентиляции;
- выбор и монтаж оборудования;
- наличие плана эвакуации.

К организационным мерам относятся:

- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- изучение инструкций, плакатов;
- наличие плана эвакуации.

Необходимо учитывать ряд мер, направленных на обеспечение тушения пожара:

- обеспечить подъезды к зданию;
- обесточить электрические кабели;
- наличие пожарных щитов и ящиков с песком в коридорах;
- наличие гидрантов с пожарными рукавами;
- тепловая сигнализация;
- огнетушители: углекислотный ОУ 2.

Пожарная безопасность может быть обеспечена мерами пожарной профилактики и активной пожарной защиты. Пожарная профилактика

включает комплекс мероприятий, необходимых для предупреждения возникновения пожара или уменьшения его последствий.

Для выявления соответствия рабочего места требованиям безопасности на предприятии проводится аттестация и сертификация постоянных рабочих мест, как в части условий труда, так и в части проводимых технологических процессов, используемого оборудования и средств защиты.

По результатам проверки соответствия рабочего места требованиям безопасности заполняют карты аттестации рабочих мест, в которых фиксируются нормативное и фактическое значение факторов, характеризующих условия труда, наличие соответствия требованиям безопасности средств коллективной и индивидуальной защиты, средств обучения, соответствие требованиям безопасности оборудования, а также производится гигиеническая классификация условий труда.

Одна из важнейших задач работодателя при аттестации рабочих мест - контроль тяжелых, особо тяжелых, вредных и особо вредных условий труда -. Это связано с наличием целого ряда льгот и компенсаций, положенным лицам, занятым на этих работах (дополнительный отпуск, сокращенный рабочий день, доплаты к зарплате, право на бесплатное получение молока или лечебно-профилактического питания, льготная пенсия).

Официальное заключение об оценке условий труда дают органы экспертизы условий труда объектов РФ. При оценке условий труда и аттестации рабочих мест используют, как правило, санитарно-промышленные лаборатории. Возможно использование санитарно-эпидемиологических станций, лабораторий вузов и т. п. Метрологическое обеспечение работ в области безопасности труда и в том числе по оценке условий труда и аттестации рабочих мест определено ГОСТ 12.0.005 - 84.

9.3 Региональная безопасность

Выявим предполагаемые источники загрязнения окружающей среды, возникающие в результате реализации конструкторских и технологических решений.

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-технологических достижений.

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.

Важными направлениями следует считать совершенствование технологических процессов и разработку нового оборудования с меньшим уровнем выбросов в окружающую среду, замену и по возможности широкое 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 мероприятиям по рациональному размещению источников загрязнения: оптимальное расположение промышленных предприятий с учетом местности; установление санитарно-защитных норм вокруг промышленных предприятий.

На участке сборки в процессе работы образуются такие вещества как пыль, и аэрозоли. Для их удаления применяют вытяжную вентиляцию, для снижения выбросов этих веществ в атмосферу применяют фильтры.

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.).

С целью охраны окружающей среды от загрязнений предусматривается внедрение:

- системы оборотного водоснабжения;
- системы очистки дождевой канализации;
- пыле и газоулавливания.

Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам.

Нормативными показателями экологичности предприятий, транспортных средств, производственного оборудования и технологических процессов являются ПДВ в атмосферу, ПДС в гидросферу, а также нормативы образования и лимиты размещения отходов, которая является основой для проведения общественной и государственную экологической экспертизы.

Цель экологической экспертизы новой продукции — предупреждение возможного превышения допустимого уровня вредного воздействия на окружающую среду в процессе ее производства, эксплуатации (использовании), переработки или уничтожения.

Главная задача экологической экспертизы - определение полноты и достаточности мер по обеспечению требуемого уровня экологической безопасности новой продукции при ее разработке, в том числе:

По результатам экологической экспертизы составляется экспертное заключение

В соответствии с требованиями ГОСТ 17.2.3.02-78 для каждого источника загрязнения атмосферы устанавливается предельно допустимый выброс вредных веществ (ПДВ) - это объем загрязнения в выбросах в мг/м, который на протяжении всей жизни человека не оказывает на него вредного воздействия и вредные последствия на окружающую среду.

9.4 Особенности законодательного регулирования проектных решений.

Надзор и контроль за соблюдением законодательства о труде и правил по охране труда осуществляют:

- специально уполномоченные государственные организации и инспекции, не зависящие в своей деятельности от администрации предприятий, учреждений, организаций и их вышестоящих органов;
- профессиональные союзы, а также состоящие в их ведении техническая и правовая инспекции труда.

Первая очередь контроля осуществляется профессиональными союзами, которые осуществляют государственный надзор посредством находящихся в их ведении инспекций и общественный контроль за счет широкого привлечения профсоюзного актива.

Министерства и ведомства осуществляют внутриведомственный контроль за соблюдением законодательства о труде в отношении подчиненных им предприятий, учреждений, организаций.

Высший надзор за точным исполнением законов о труде всеми министерствами и ведомствами, предприятиями, учреждениями и организациями и их должностными лицами возлагается на Генерального Прокурора РФ.

Законодательством для работодателей, руководителей работ и

работников определена ответственность за соблюдение нормативных условий и безопасность деятельности подчинённых, соблюдение нормативных воздействий производства на окружающую среду. За нарушение правил безопасности применяется дисциплинарная или административная ответственность, а в случае с особо тяжёлыми последствиями и уголовная.

Незнание указанных правил и норм не снижает ответственности за их нарушение. На рабочих и служащих возлагаются обязанности: соблюдение инструкций по охране труда, установленных требований обращения с машинами и механизмами и пользования средствами индивидуальной защиты. Невыполнение этих обязанностей рабочими и служащими является нарушением трудовой дисциплины. Инструкции по охране труда устанавливают правила выполнения работ и поведения работающих в производственных помещениях и на строительных площадках. Рабочие и служащие обязаны также соблюдать установленные требования обращения с машинами и механизмами, а также пользоваться выдаваемыми им средствами индивидуальной защиты.

Внутрипроизводственный контроль за охраной труда во всех подразделениях и проведением мероприятий по обеспечению здоровых и безопасных условий труда осуществляют инженер по охране труда и отвечает за организацию разработки мероприятий по охране труда в производственных подразделениях, принимает участие во внедрении этих мероприятий; осуществляет контроль за соблюдением на предприятии законодательства по охране труда и проверку выполнения намеченных мероприятий, участвует в комиссиях по рассмотрению проектов строительства, реконструкции, ремонта цехов и оборудования и по приемке их в эксплуатацию; в расследовании причин аварий и несчастных случаев.

9.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

На предприятии возможны следующие чрезвычайные ситуации (ЧС):

- Результат стихийных бедствий и особо опасных инфекций.
- Воздействие внешних природных факторов, приводящих к старению или коррозии металлов, конструкций, сооружений и снижение их физико-механических показателей.
- Проектно-производственные дефекты сооружений.
- воздействие технологических процессов промышленного производства на материалы сооружений (нагрузки, высокие температуры, скорость, вибрация).
- Нарушение правил эксплуатации сооружений и технических процессов.
- Нарушение правил техники безопасности при ведении работ и технологических процессов.
- Ошибки, связанные с системой отбора руководящих кадров, низким уровнем профессиональной подготовки рабочих и их некомпетентностью и безответственностью.

Способность продолжать работу в чрезвычайной ситуации и выпускать в требуемых объемах нужную продукцию определяется его устойчивостью. Под повышением устойчивости функционирования организации в ЧС понимается комплекс мер по предотвращению или ограничению угрозы жизни и здоровью персонала и проживающего вблизи населения и материального ущерба в чрезвычайной ситуации, в также подготовке к проведению спасательных и других неотложных работ в зоне ЧС.

Под подготовкой объекта к работе в ЧС понимается заблаговременно проводимые организационные, инженерно-технические и специальные мероприятия их работы с учетом риска возникновения ЧС.

Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был спроектирован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью $P_{2H} = 90$ Вт, частотой вращения $n = 3000$ об/мин, числом пар полюсов $2p = 2$, напряжением $U_n = 220$ В.

В разделе электромагнитный расчет путем пробных ходов при помощи математической программы MathCAD и рекомендаций технической литературы и справочных источников были рассмотрены и проанализированы результаты расчетов для достижения поставленной задачи. В результате было выбрано самое приемлемое решение и спроектирован двигатель с более высокими энергетическими показателями КПД и коэффициентом мощности $\cos \varphi$ по сравнению с базовой моделью, на которую ориентировались при проведении всех расчетов. У спроектированного двигателя $\text{КПД} = 0,66$ и $\cos \varphi = 0,74$, у прототипа: $\text{КПД} = 0,6$ и $\cos \varphi = 0,7$.

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

Обмотка статора выбрана однослойной, обмотка ротора литая из алюминия. В двигателе применена изоляция класса F , которая допускает длительный нагрев обмотки статора до 115°C .

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

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

В специальной части для оценки динамических характеристик спроектированного асинхронного двигателя при работе на нагрузку

промышленного вентиля, был использован метод виртуального моделирования в пакете прикладных программ Matlab Simulink. При сравнении полученных результатов с техническими данными привода, определили, что спроектированный двигатель соответствует требуемым параметрам.

При выполнении технологической части выпускной квалификационной работы был разработан комплект документов и технологический процесс на общую сборку АД с учетом требований техники безопасности. Выбрано оборудование и оснастка для сборки. Проведен размерный анализ машины и рассчитаны допуски на размеры составных элементов. Определены нормы времени и необходимое количество оборудования для выполнения требуемой программы выпуска.

В экономической части работы проведено обоснование целесообразности разработки проекта, сформирован план его разработки и рассчитана смета затрат на проведение научно – исследовательской работы, определена себестоимость проекта. Проведен анализ критериев, определяющих конкурентоспособность нового изделия, и оценка его технического уровня.

В разделе «Социальная ответственность» рассмотрены вопросы по выполнению требований к безопасности и гигиене труда, к промышленной безопасности и охране окружающей среды. Проведен анализ опасных и вредных факторов, возникающих в процессе сборки двигателя. Освещены вопросы пожарной безопасности и в чрезвычайных ситуациях, ответственность в рамках законодательства за безопасные условия труда.

В результате проведенной работы, был спроектирован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для применения его в качестве исполнительного механизма при работе на нагрузку промышленного вентиля, применяемого в системе автоматики и удовлетворяющий основным, для всех ЭМММ независимо от функций, и специфическим требованиям данной системы - это динамические характеристики и надлежащее быстродействие.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дмитриев В. Н. Проектирование и исследование асинхронных двигателей малой мощности: учебное пособие. /В. Н. Дмитриев. – Ульяновск, 2006. – 92 с.
2. Проектирование электрических машин/ под ред. Копылова И. П.– М.: Юрайт, 2014.— 767 с.
3. Юферов Ф.В. Электрические машины автоматических устройств: Учеб. Для студентов, обучающихся по спец. «Электромеханика» - 2-е изд., перераб. и доп. – М: Высш. Шк., 1988. – 479 с.: ил.
4. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник / А. Э. Кравчик, Шлаф М. М., В. И. Афонин и др. – М.:Энергоатомиздат, 1990. - 504 с.
5. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин. /О. Д. Гольдберг, Е. С. Гурин, И. С. Свириденко. - М.: Высшая школа, 2001. — 431 с.
6. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. Т. 2/ с 74 Под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1989.-688 с.:
7. Токарев Б.Ф. Электрические машины. - М.: Энергоиздательство, 1989.
8. Вольдек, А. И. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. /А. И. Вольдек, А.И. Попов В.В. - Л.: Питер, 2008.- 350 с.
9. Анурьев В.И. Справочник конструктора – машиностроителя. Т. 2. – 6-е изд., переработанное и дополненное – М.: Машиностроение, 1982. – 584 с.
10. Антонов В.М. Технология производства электрических машин: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 1993. – 592 с.: ил.
11. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин и приборов в

- условиях массового, крупносерийного и среднесерийного типов производства. - М.: Машиностроение, 1991.
12. Допуски и посадки: Справочник. В 2-х ч./В.Д. Мягков, М.А. Палей, А.Б. Романов, В.А. Брагинский. - 6-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1982. – Ч. 1. 543 с., ил.
 13. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985.-655 с.
 14. Замятин В.К. Технология и оснащение сборочного производства машиноприборостроения: Справочник – М: Машиностроение, 1995. – 608 с.: ил.
 15. Коршунова Л.А., Кузьмина Н.Г. Инновационный менеджмент (менеджмент инноваций): учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2010.
 16. Техничко-экономическое обоснование инновационного проекта: методические указания по выполнению экономического раздела ВКР для студентов энергетических специальностей всех форм обучения. Составители: Коршунова Л.А., Кузьмина Н.Г. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 42 с.

Схема однослойной трехфазной обмотки статора

$2p = 2, Z = 18, a = 1, q = 3, y = 9 (1-10)$

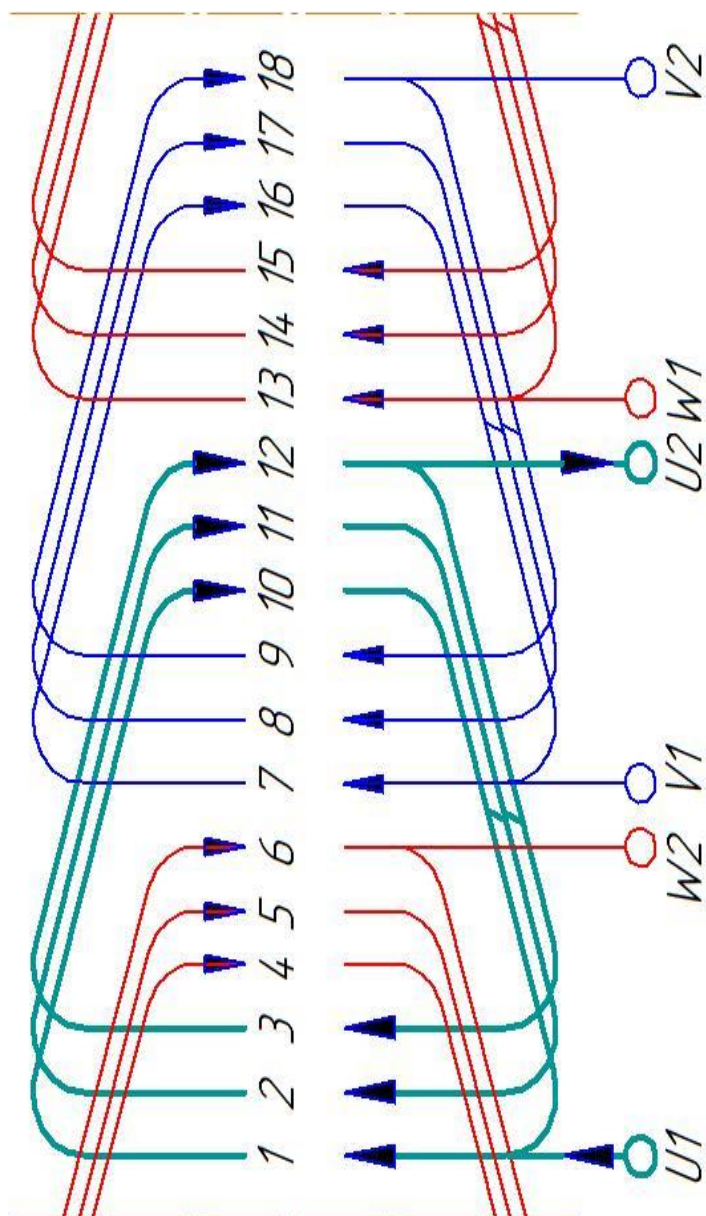
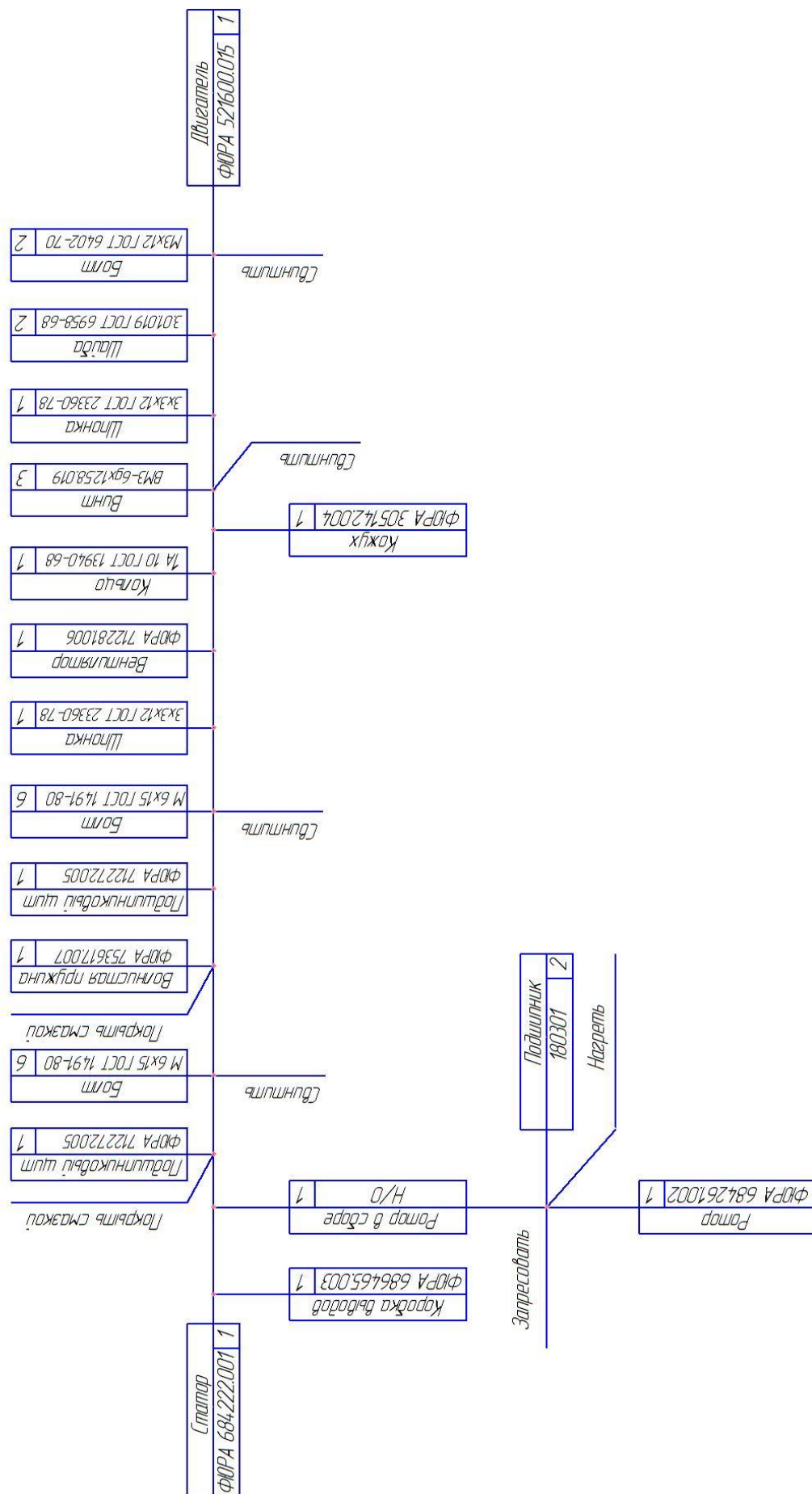


Схема сборки асинхронного двигателя.



Программа в MatLab, листинг:

```

function dy = modelAD(t,y)
dy = zeros(5,1);      % a column vector

% задаем параметры АД
rs = 109.6; % Сопротивление статора
rr = 90.7; % сопротивление ротора
Tr = 1; % Вектор магнитного потока
Ls = 53.67; % индуктивное сопротивление обмоток статора
w = 314; %угловая скорость
p = 1; %число пар полюсов
kr = 1; % расчетный коэффициент
Usa = 380*sin(50*t); % альфа Напряжение
Usb = 380*cos(50*t); % бета Напряжение
Jag = 0.00012;% момент инерции АД
Mvr = 0.0000; % работа на ХХ

% окончание задания параметров

dy(1) = Usa/Ls - rs*y(1)/Ls + kr*y(3)/(Ls*Tr) + kr*p*w*y(4)/Ls;
%y3 - альфа ток статора
dy(2) = Usb/Ls - rs*y(2)/Ls + kr*y(4)/(Ls*Tr) - kr*p*w*y(3)/Ls;
%y4 - бета ток статора
dy(3) = kr*rr*y(1) - y(3)/Tr - p*w*y(4); %y5 - альфа
потокосцепление ротора
dy(4) = kr*rr*y(2) - y(4)/Tr + p*w*y(3); %y6 - бета
потокосцепление ротора
dy(5) = kr*(y(4)*y(2) - y(3)*y(1))/(Jag) - Mvr/(Jag); %y9 -
выражение для момента
end

%выполнение моей программы
%options = odeset('RelTol',1e-4,'AbsTol',[1e-4 1e-4 1e-5 1e-4 1e-
4]);
%[T,Y] = ode45(@modelAD,[0.1 20],[0 0 0 0 0],options);
%plot(T,Y(:,1),'-',T,Y(:,2),'-
.',T,Y(:,3),'.',T,Y(:,4),'.',T,Y(:,5),'.')

```