

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

Институт ИнЭО
Специальность Электромеханика
Кафедра Электротехнических комплексов и материалов

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Проектирования асинхронного электродвигателя с частотным управлением для поворотных механизмов.

УДК: 621.313.333.07.001.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Давлятов Д.А		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Падалко Д.А	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романцов И.И.	к.т.н., доцент		

По разделу «Технологическая часть»

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

По разделу «Электромагнитный расчет, специальная часть»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Падалко Д.А	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭКМ	Гарганеев А.Г.	д.т.н., профессор		

Целью данного дипломного проекта является проектирования асинхронного двигателя с частотным регулированием. Изучение работы спроектированной электрической машины в широком частотном диапазоне.

исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).	
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Обмотка статора. 2. Рабочие и пусковые характеристики. 3. Технологическая часть. 4. Сборочный чертеж. 5. График безубыточности. 6. Специальная часть.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
«Электромагнитный расчет, специальная часть»	Падалко Д.А
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Мелик-Гайказян М.В.
«Социальная ответственность»	Романцов И.И.
«Технологическая часть»	Баранов П.Р.
Названия разделов, которой должен быть написаны на русском и иностранном языках: 1. Литературный обзор. 2. Электромагнитный расчет. 3. Тепловой и вентиляционный расчет. 4. Механический расчет. 5. Технологическая часть. 6. Специальная часть. 7. Социальной ответственность. 8. Финансовый менеджмент. 9. Заключение.	

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

Задание выдал руководитель:

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

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Давлятов Дилмурад Абдумуминович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА ПО ТЕМЕ:

«ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г11	Давлятову Дилмураду Абдумуминровичу

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Технологический процесс общий сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»:	
Сборочный чертеж асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, спецификация;	
Годовая программа выпуска изделия 13500 штук	
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>Анализ конструкции электрических машин на технологичность</i>	<i>2. Составит схему сборки электрической машины</i>
<i>3. Выбрать обозначения, приспособления для сборки и испытания электрической машины</i>	<i>4. Разобрать маршрутную технологию сборки электрической машины</i>
<i>5. Определить нормы времени на операции и оборудования</i>	<i>6. Построит график загрузки оборудования</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	
<i>Комплект маршрутных карт и карты эскизов (в приложении)</i>	
<i>График загрузки оборудования</i>	
<i>Схема сборки электрической машины</i>	

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.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Давлятову Дилмураду Абдумуминровичу		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г11	Давлятову Д.А

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электромеханика

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

<i>Стоимость ресурсов:</i>	<i>Стоимость материалов, технического оборудования, информационных и трудовых ресурсов</i>
<i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»</i>
<i>Используемая система налогообложения</i>	<i>Отчисления во внебюджетные страховые фонды (30 % от заработной платы)</i>
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений (ИР)</i>	<i>Определение конкурентоспособности проекта, анализ рынка продукта</i>
<i>Оценка целесообразности производства двигателя</i>	<i>Определение себестоимости, рентабельности и критического объема продукции</i>
<i>Оценка ресурсной эффективности продукции</i>	<i>Расчет экономии затрат на силовую электроэнергию при эксплуатации</i>
Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)	
<i>График безубыточности для данного вида продукции.</i>	

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	24.04.2016г
--	-------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Мелик-Гайказян М.В.	к.э.н, доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Давлятов Д.А		

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г11	Давлятов Д.А

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	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, шум, 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;
 - микроклимат;
 - расчет освещения;
 - 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
Старший преподаватель кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Романцов Игорь Иванович	Кандидат технических наук		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Давлятов Д.А		

Содержание

Реферат	9
Введение	9
Литературный обзор.....	12
1. Обоснование и выбор основных размеров.....	17
2. Электромагнитный расчёт	19
2.1 Определение числа пазов, количества витков и площади поперечного сечения провода обмотки статора	19
2.2 Расчёт зубцовой зоны статора.....	22
2.3 Расчёт ротора	25
2.4 Расчёт магнитной цепи	31
2.5 Параметры рабочего режима.....	35
2.6 Расчёт потерь	41
2.7 Расчёт рабочих характеристик	45
2.8 Расчёт пусковых характеристик.....	47
3. Тепловой расчёт.....	55
4. Вентиляционный расчёт	59
5. Механический расчёт	60
6. Специальная часть частотно-регулируемый пуск двигателя	68
7. Технологический процесс общей сборки асинхронного двигателя короткозамкнутым ротором.....	73
7.1 Актуальность технологической части	73
7.2 Оценка технологичности конструкции	73
7.3 Технологичность конструкции изделия	74
7.4 Составление схемы сборки и маршрутной технологии общей сборки	77
7.5 Выбор сборочного оборудования и оснастки.....	78
7.6 Выбор оборудования.....	80
7.7 Выбор инструмента	83
7.8 Выбор подъемно-транспортных средств	83
7.9 Нормирование сборочных работ и расчет количества технологического оборудования для обеспечения заданной программы	83
8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	89
8.1 Оценка коммерческого потенциала проектируемого двигателя	89
8.1.1 Анализ потенциальных рисков и разработка мер по управлению ими	89
8.1.2 Оценка конкурентоспособности проектируемого двигателя.....	92
8.2 Расчет себестоимости производства двигателя.....	93
8.2.1 Материальные затраты	94
8.2.2 Расходы на электроэнергию	95
8.2.3 Полная заработная плата технологических рабочих	97
8.2.4 Отчисление во внебюджетные фонды	98

8.2.5 Накладные расходы.....	99
8.3 Определение рентабельности продукции	100
8.4 Расчет прибыли, определение критического объема производства.....	100
8.5 Расчет экономии электроэнергии при эксплуатации двигателя	103
9. Социальная ответственность	105
9.1 Анализ опасных и вредных факторов	105
9.2 Производственная санитария	106
9.3 Расчет искусственного освещения.....	107
9.4 Выбор системы освещения.....	107
9.5 Выбор коэффициента запаса	108
9.6 Размещение осветительных приборов.....	109
9.7 Расчет осветительной установки	110
9.8 Микроклимат	112
9.9 Техника безопасности слесаря электрических машин	114
9.10 Требования безопасности перед началом работы.	116
9.11 Пожарная безопасность	118
9.12 Содержание зданий и помещений на объединении	118
9.13 Каждый работающий на объединении должен знать	119
9.14 Охрана окружающей среды.....	120
Заключение.....	122
Список использованных источников.....	124
Приложения А Схема простой петлевой обмотки	
Приложения Б Рабочие характеристики асинхронного двигателя	
Приложения В Пусковые характеристики двигателя	
Приложения Г Эскиз паз ротора в штампе размером мм	
Приложения Д Эскиз паз статора в штампе с заполнением	
Приложения Е Схема сборки	
Приложения Ж Машрутная карта	
Графические материалы	
Сборочный чертеж Асинхронного двигателя Обмотка статора. Паз статора и ротора. Ротор	

Реферат

Выпускная квалификационная работа содержит 116 страниц печатного текста, 15 таблиц, 7 приложений, 16 источников литературы, 13 рисунков, 5 графических работ.

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ОБМОТКА, ПУСКОВЫЕ И РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ, МЕНЕДЖМЕНТ, СПЕЦ ЧАСТЬ – ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ.

Объектом исследования является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с частотным регулированием.

Цель работы - спроектировать трёхфазный асинхронный двигатель с частотным регулированием, мощностью 42 кВт с наименьшими технологическими изменениями.

В работе проделаны электромагнитный, тепловой, механические расчеты. Разработан технологический процесс общей сборки двигателя, рассмотрена безопасность и экологичность проекта, произведён финансовый анализ.

Введение

Электромеханические преобразователи энергии (двигателя) представляет собой конструктивное единство. Они преобразовывают электрическую энергию в механическую. Соответственно с указанным алгоритмом работы технологической установки. Применение электрического привода в настоящее время постоянно расширяется. В основном в промышленности, и на транспорте. В настоящее время 70 % электрические энергии потребляют электрические двигатели. Таким образом, эффективность энергосберегающих технологий в большинстве определяется эффективностью электропривода. Приоритетным направлениям развития современной техники является разработка компактных, экономичных и высокопроизводительных приводов.

XXI век ознаменовался значительно многими успехами силовой электроники — было освоено промышленное производство биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и силовые модули на их основе, силовые интеллектуальные модули с встроенным средством защиты ключей и интерфейсом для подключения к системе управления. Год за год рост степени интеграции микропроцессорной техники увеличивалось. Это привело массовой замены аналоговых систем управления на прямого цифрового управления.

Прямая цифровая управления, это не только непосредственное управления микроконтроллера ключей силового преобразователя, но и возможность прямого вывода в микроконтроллер различные обратные связи. Связи не зависят от типа сигнала: аналоговой, дискретной или импульсной. Система прямого цифрового управления дает возможность отказаться от дополнительных интерфейсных плат и одноплатных контроллеров.

Тенденции развития электропривода ведущих мировых производителей и на материалах опубликованных научных исследований показывает что:

- Применение систем привода с двигателями постоянного тока уменьшается, а систем привода с двигателями переменного тока увеличивается.

Это связано с тем, что малой надёжностью механического коллектора и высокой стоимостью коллекторных двигателей постоянного тока. По прогнозам специалистов считается, что в начале XXII века доля приводов постоянного тока сократится на 10%.

В настоящий время преимущественное применение имеет система привода с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором. Большинство таких приводов, около 82 % нерегулируемые. Доля частотно регулируемых асинхронных электроприводов увеличивается в связи с резким удешевлением статических преобразователей частоты.

Литературный обзор

Для большинства проводов, таких как насосы, вентиляторы, компрессоры, конвейеры, требуется небольшой диапазон регулирования скорости от 1:10 до 1:20 и относительно низкие быстродействия. При этом будет лучше, если использовать классический структуру скалярного управления. А при широком диапазоне регулирования скорости 1:10000, требуется применения сложных структур векторного управления. Они используются для быстродействующих приводом станков, транспортных средств и роботов. Применение таких приводов в настоящее время составляет около 5 % от общего числа и постепенно растет.

В начале века на базе систем векторного управления был разработан ряд многих приводов с прямым цифровым управлением момента. Отличительной особенностью этих решений является высокой быстродействия контура тока, реализованных на базе цифровых релейных регуляторов. Они работают на принципе нечёткой логики. Системы прямого цифрового управления моментом первой очередь используется на транспорте, на кранах, робототехнике и лифтах.

Кроме прямого цифрового управления применяется дополнительно функция поддержки интерфейса с пользователем. Как оперативное управление через пульт. А также можно управлять с технологическим процессом. Возможность управления состоит из универсального регулятора, генератор управляющих воздействий на базе часов реального времени.

Частотно-регулируемые крановые электродвигатели.

Асинхронный двигатель в системах частотного регулирования имеет ряд своих особенности. В первый очередь значительно снижается потери энергии в двигателях. А в основных пуско-тормозных режимах. При проектировании двигателя основное внимание уделяется на снижению потерь в обмотках. Это позволяет, увеличит высокооборотные электроприводы.

В новейших частотно регулируемых электроприводах асинхронных двигателей с векторным управлением механические характеристики

сформируется системой управления преобразователя. Вот и по этому при проектировании асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, которые работают только с преобразователями частоты, не надо предпринимать такие меры как повышения перегрузочной способности и изменение пускового момента.

В системах частотного регулирования оптимальная частота вращения двигателей выше, чем обычных системах оптимальная частота вращения для легкого и среднего режима работы составляет 1900-1800 об/мин, а для тяжелого режима 100-800 об/мин. При проектировании электродвигателя следует считать максимальную частоту вращения проектируемого электропривода и максимально допустимую частоту вращения редуктора.

При повышении частоты выходного напряжения от 1,5 до 2 раза по отношению к номинальной частоте двигатель должен быть работоспособным.

Чтобы снизить потери обмотки ротора двигатель заливается чистым алюминием и скольжения при этом минимальные.

Регулирования выходного напряжения и частоты двигателя обеспечивает работу двигателя в режиме минимальных потерь. Он позволяет оптимизировать использования его активных частей.

Электропривод механизмов горизонтального перемещения.

Механизму горизонтального перемещения относятся такие механизмы как аппараты продвижения кранов, грузовых тележек и механизмы поворота.

Все выше указанные механизмы имеет реактивный момент нагрузки. Это не зависит от направления движения.

Идеальные электроприводы механизма горизонтального перемещения должен иметь жесткое характеристики в тормозном и двигательном режимах. Рисунок 1 Электроприводы механизмов горизонтального перемещения тормозном режиме занимает лишь не большое время цикла и возникает при переходе с высших скоростей на низких.

Электропривод механизмов горизонтального перемещения в тормозном режиме может работать при движении под уклоном и при движении по ветру.

Многочисленные механизмы горизонтального передвижения обладают высоким моментом инерции, в следствие этого, в избежание высоких динамических нагрузок в металлоконструкции и механизмы электропривода должен ограничивать ускорения при пуске и торможении.

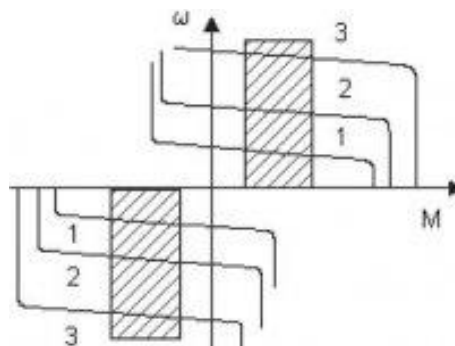


Рисунок 1. Желаемые механические характеристики электропривода механизма горизонтального перемещения

В взаимосвязи с огромным фактором инерции электродвигатели подобных элементов избираются с учетом высоких пусковых потерь, из-за данного статический момент в валу электродвигателей в установившемся порядке никак не превосходит, равно как норма, 50% номинального момента. Масса перевозимого багажа, равно как норма, проявляет незначительное воздействие в неподвижный период электропривода приспособления перемещения, т.к. множество металлоконструкции крана как правило значительнее больше массы груза.

Масса груза и множество погрузочный телеги дорожного крана ранее соизмеримы, а множество погрузочный телеги башенного крана значительно менее народ багажа. Вследствие этого множество перевозимого багажа проявляет существенное воздействие в загрузку элементов.

Алгоритм управления тормозом в электроприводах механизмов горизонтального передвижения легче, чем электроприводах механизмов подъема. Из-за реактивного момента времени нагрузки устранение тормоза в основной случи можно допускать не дожидаясь, пока что момент электродвигателя вырастет вплоть до значения статического момента.

Ключевым условием представляется совмещение тормоза при скорости, недалёкой к нулевой, с целью сокращения динамических нагрузок и снижения износа тормозных накладок.

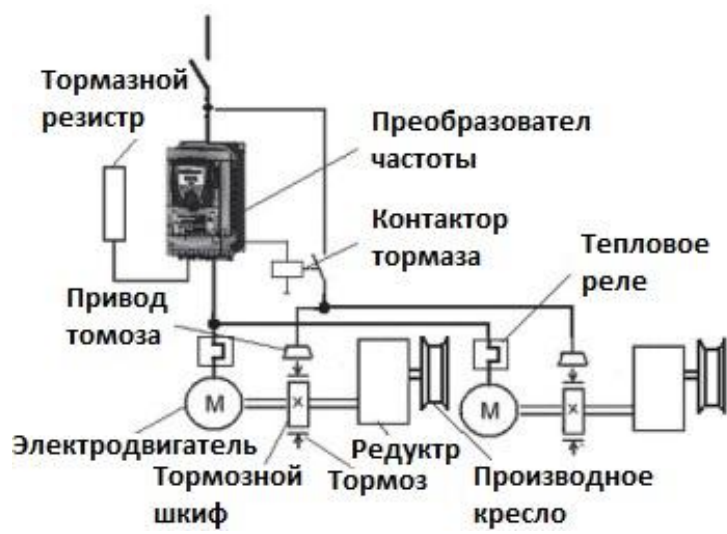


Рисунок 2. Структурная схема электропривода механизма передвижения

Особенностью электроприводов горизонтального передвижения представляется в таком случае, что не большая часть с их реализуются равно как многодвигательные приводы, к примеру, приводы элементов перемещения кранов и элементов поворота. В данном случае электродвигатели имеют все шансы питаться как от у одного преобразователя частоты. (рисунок. 2) Что же представляется более экономным вариантом, так и индивидуальных преобразователей, которые обеспечивают наиболее гибкое управления крановыми приспособлениями. Можно считать что многодвигательные приводы мостовых и козловых кранов всеобщего назначения с маленькими просветами довольно 1-го преобразователя с целью питания группу электродвигателей. В данном случае, любой электродвигатель должен быть снабжен отдельной защитой от перегрузки в виде теплового реле. (Рисунок. 2).

Наиболее трудными управлением электропривода является электроприводы механизмов поворота башенного крана. В особенности с верхним месторасположением поворотного строение. Присутствие гибких металлоконструкций, обширный интервал изменение статического момента и

момент инерции значительно усложняют управления подобными механизмами. Единый аспект к системе подобных электроприводов пока что никак не выработан, и фактически любая кран строительная компания содержит собственный вид осуществление подобного привода.

Следует заметить, что же в крановых приводах, в особенности с целью элементов роста, крайне значимым представляется проблема обеспечения тормозных систем работы приводов. При переходе мотора в режим торможения, к примеру, при опускании груза либо активном торможении крана, либо тележки, энергия торможения имеет возможность гаситься в тормозных резисторах либо рекуперироваться в сети с поддержкой особых модулей.

1. Обоснование и выбор основных размеров

Данный расчёт производится по методике предложенной в [1].

1.1 Выбираем наружный диаметр статора [1,с.343]. Для асинхронных двигателей серии по методике предложенной в [1].

$$h = 200 \text{ мм}, \quad D_a = 0.355 \text{ м. [1,с.344]}$$

1.2 Внутренний диаметр статора [1,с.344]:

$$D = D_a \cdot K_d ,$$

где K_d – коэффициент, характеризующий отношения внутренних и внешних диаметров сердечников статоров асинхронных двигателей при различных числах полюсов находится в пределах $(0.62 \div 0.68)$, принимаем

$$K_d = 0.65 \text{ [1,с.344]:}$$

$$D = 0.355 \cdot 0.65 = 0.231 \text{ м.}$$

1.3 Полюсное деление τ [1,с.344]:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 0.231}{4} = 0.181 \text{ м}$$

1.4 Расчётная мощность [1,с.344]:

$$P^I = \frac{P_{2H} \cdot K_\epsilon}{\eta \cdot \cos \varphi},$$

где K_ϵ – коэффициент ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, зависит от D_a . Выбираем $K_\epsilon = 0.96$ [1,с.345];

η - КПД двигателя, зависит от P_{2H} , принимаем равным $\eta = 0,92$ [1,с.345];

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности, зависит от P_{2H} , принимаем равным $\cos \varphi = 0,90$;

$$P^I = \frac{42 \cdot 10^3 \cdot 0.96}{0.9 \cdot 0.92} = 4,87 \cdot 10^4 \text{ ВА}$$

1.5 Предварительный выбор электромагнитных нагрузок [1,с.346];

принимаем $A = 39 \cdot 10^3 \text{ А / м}$,

принимаем $B_\delta = 0.785 \text{ Тл}$.

1.6 Выбираем обмоточный коэффициент для двухслойной обмотки [1,с.348]

при $2p = 4$ он может быть взят:

$$K_{обл} = 0.92$$

1.7 Рассчитаем длину магнитопровода [1,с.348]:

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

где k_B – коэффициент формы поля рассчитывается по формуле [1,с.348]:

$$k_B = \pi / 2\sqrt{2} = 3.14 / 2\sqrt{2} = 1.11$$

Ω - синхронная угловая частота вала [1,с.348]:

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{f_1}{p} = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{50}{2} = 157 \text{ рад/с};$$

$$l_\delta = \frac{48700}{1.11 \cdot 0.230^2 \cdot 157 \cdot 0.92 \cdot 39 \cdot 10^3 \cdot 0.785} = 0.186 \text{ м}.$$

1.8 Критерием правильности выбора главных размеров служит отношение λ , определяемое по формуле:

$$\lambda = l_\delta / \tau = 0.186 / 0.181 = 1.027$$

Полученное значение входит в область рекомендуемых пределов [1,с.348]

$$\lambda = 0.5 - 1.45.$$

2. Электромагнитный расчёт

2.1 Определение числа пазов, количества витков и площади поперечного сечения провода обмотки статора

2.1.1 Выберем предельные значения зубцового деления t_{Z1} [1,с.351]:

$$t_{Z1min} = 0.012 \text{ м}; \quad t_{Z1max} = 0.016 \text{ м}.$$

2.1.2 Возможное число пазов статора Z_1 [1,с.351]:

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1max}} = \frac{3.14 \cdot 0.231}{0.016} \approx 45;$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1min}} = \frac{3.14 \cdot 0.231}{0.012} \approx 60;$$

Выбираем окончательно число пазов статора равным $Z_1 = 48$. Выбор обосновывается тем, что число пазов статора в большинстве асинхронных двигателей должно быть кратно числу фаз, а число пазов на полюс и фазу (q) - целым. Обмотки с дробным числом q при сравнительно небольших числах пазов и полюсов, характерных для большинства асинхронных двигателей, приводят к некоторой асимметрии МДС. Большее количество пазов приводит к улучшению рабочих характеристик, но и, одновременно, к увеличению расхода меди, т.е. стоимость машины при этом повышается. Обмотка двухслойная.

Проверим величину q :

$$q = Z_1 / 2 \cdot p \cdot m = 48 / 2 \cdot 2 \cdot 3 = 4.$$

2.1.3 Окончательное значение зубцового деления статора [1,с.457] :

$$t_{Z1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{3.14 \cdot 0.231}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 4} = 0.015 \text{ м}.$$

Рассчитаем номинальный ток обмотки статора [1,с.352]:

$$I_{1ном} = \frac{P_{2н}}{m \cdot U_{1ном} \cdot \cos \varphi \cdot \eta} = \frac{42000}{3 \cdot 220 \cdot 0.88 \cdot 0.9} = 68,871 \text{ А}.$$

Определим число эффективных проводников в пазу.

$$u_{\Pi} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{ном} \cdot Z_1} = \frac{3,14 \cdot 0,231 \cdot 36 \cdot 10^3}{68,871 \cdot 48} = 7,894$$

Принимаем $a = 2$, тогда значение числа проводников в пазу [1,с.352]:

$$U_{\Pi} = a \cdot u_{\Pi} = 2 \cdot 7,864 = 15,789$$

Окончательно принимаем $U_{\Pi} = 16$.

2.1.4 Число витков в фазе обмотки статора [1,с.352]:

$$w_1 = \frac{U_{\Pi} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{16 \cdot 48}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 64$$

2.1.5 Найдём окончательное значение линейной нагрузки [1,с.353]:

$$A = \frac{2 \cdot I_{ном} \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 68,871 \cdot 64 \cdot 3}{3,14 \cdot 0,230} = 3,648 \cdot 10^4 \text{ А / м}$$

Рассчитаем значение потока [1,с.352]:

$$\Phi = \frac{K_{\varepsilon} \cdot U_{ном}}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot K_{об1} \cdot f_1} = \frac{0,97 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 64 \cdot 0,92 \cdot 50} = 0,016 \text{ Вб.}$$

Определим значение индукции в воздушном зазоре [1,с.353]

$$B_{\delta} = \frac{\Phi \cdot p}{D \cdot l_{\delta}} = \frac{16,325 \times 10^{-3} \cdot 2}{0,231 \cdot 0,188} = 0,759 \text{ Тл.}$$

Значение A находится в рекомендуемом пределе $A = (36 - 39) \cdot 10^3 \text{ А/м}$, а B_{δ} - в допустимом, выходя за рекомендуемый предел ($B_{\delta} = 0,75 - 0,8 \text{ Тл}$) на рисунок. 1.4

2.1.6 Определим допустимую плотность тока в обмотке статора, с учётом линейной нагрузки двигателя [1,с.354]

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

где AJ – среднее значение произведения [1,с.354], зависит от D_a ;

$$AJ = 185 \cdot 10^9 \text{ А}^2/\text{м}^3$$

$$J_1 = \frac{185 \cdot 10^9}{36,48 \cdot 10^3} = 5,071 \cdot 10^6 \text{ А /м}^2.$$

2.1.7 Площадь поперечного сечения эффективного проводника предварительно [1,с.353]:

$$q_{эф} = \frac{I_{ном}}{a \cdot J_1} = \frac{68,871}{2 \cdot 5,071 \cdot 10^6} = 6,791 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Окончательно выберем сечение проводника следующим образом:

Примем число элементарных проводников $n_{эл} = 6$, (разбиваем сечение на элементарные провода более тонкого диаметра для удобства намотки) тогда

$$q_{эл} = \frac{q_{эф}}{n_{эл}} = \frac{6,791 \cdot 10^{-6}}{6} = 1,132 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Принимаем обмоточный провод марки ПЭТ-155 [1,с.713]:

$d_{эл} = 1,25 \text{ мм}$ – диаметр неизолированного провода ;

$d_{из} = 1,33 \text{ мм}$; , тогда

$$q_{ср.эф.} = q_{эл} \cdot n_{эл} = 1,227 \cdot 6 = 7,362 \text{ мм}^2.$$

2.1.8 Уточнённое значение плотности тока в обмотке статора [1,с.354]:

$$J_1 = \frac{I_{ном}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} = \frac{68,871}{2 \cdot 1,227 \cdot 6} = 4,677 \text{ А /мм}^2.$$

Значение плотности тока лежит в допускаемых пределах 4-6,5 А /мм²

2.2 Расчёт зубцовой зоны статора

2.2.1 Выбор формы паза статора. Круглые обмоточные провода насыпной обмотки могут быть уложены в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при насыпных обмотках выбирают таким образом, чтобы параллельные грани имели зубцы, а не пазы статора. Такие зубцы имеют постоянное, не изменяющееся с высотой зубца поперечное сечение, индукция в них также не изменяется, и магнитное напряжение зубцов с параллельными гранями оказывается меньше, чем магнитное напряжение трапецидальных зубцов, при том же среднем значении индукции в них. Это объясняется отсутствием в зубцах с параллельными гранями участков с высокой индукцией, напряжённость поля в которых резко возрастает из-за нелинейности магнитной характеристики стали, увеличивая суммарное магнитное напряжение зубцов. В большинстве современных двигателей выполняют трапецидальные пазы. Поэтому выбираем именно такие пазы (Рисунок 3.).

2.2.2 Расчёт зубцовой зоны статора.

Выбираем допустимые значения индукции [1,с.357]:

ярма статора – $B_a = 1,4 \text{ Тл}$; зубцов статора при постоянном сечении –

$$B_{z1} = 1.6 \text{ Тл},$$

Выбираем способ изолирования листов – оксидирование, тогда коэффициент заполнения сердечника сталью $k_c = 0.97$ [1,с.358].

2.2.3 Определим ширину зубцов статора [1,с.362]:

$$b_{z1} = \frac{B_\delta \cdot t_{z1} \cdot l_\delta}{B_{z1} \cdot l_{\text{сст}} \cdot k_c} = \frac{0,759 \cdot 0,015 \cdot 0,186}{1.6 \cdot 0,186 \cdot 0.97} = 7,39 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Найдём высоту ярма статора [1,с.362]:

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0,016}{2 \cdot 1.4 \cdot 0,186 \cdot 0.97} = 0.032 \text{ м}.$$

Высота шлица $h_{ш} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, для двигателей с $h = 200 \text{ мм}$. Высота шлица полузакрытых пазов $b_{ш} = d_{из} + (1,5 + 2) = 1,332 + 2 = 3,332 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

По рекомендации [1] принимаем:

$$b_{\text{ш}} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}, [1, \text{с.363}]$$

Определим размеры паза в штампе [1, с.362]:

$$h_{\text{ш}} = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0,355 - 0,231}{2} - 0,032 = 0,03 \text{ м};$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_{\text{ш}} - b_{\text{ш}}) - Z_1 \cdot b_{Z1}}{Z_1 - \pi},$$

$$b_1 = \frac{3,14(0,231 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 3,7 \cdot 10^{-3}) - 48 \cdot 7,39 \cdot 10^{-3}}{48 - 3,14} = 0,0081 \text{ м};$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2 \cdot h_{\text{ш}})}{Z_1} - b_{Z1} = \frac{3,14 \cdot (0,231 + 2 \cdot 0,03)}{48} - 7,39 \cdot 10^{-3} = 0,012 \text{ м}.$$

Клиновую часть паза найдём из выражения [1, с.365]:

$$h_{\text{н.к.}} = h_{\text{ш}} - \left(h_{\text{ш}} + \frac{b_1 - b_{\text{ш}}}{2} \right) = 0,03 - \left(1 \cdot 10^{-3} + \frac{(8,133 - 3,7) \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 0,027 \text{ м}.$$

2.2.4 Размеры паза в свету с учётом припуска на шихтовку сердечника [1, с.360, 363]:

$$\Delta b = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad \Delta h = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b = (12 - 0,2) \cdot 10^{-3} = 11,421 \text{ мм};$$

$$b'_1 = b_1 - \Delta b = (8,133 - 0,2) \cdot 10^{-3} = 7,933 \text{ мм};$$

$$h'_{\text{н.к.}} = h_{\text{н.к.}} - \Delta h = (27 - 0,2) \cdot 10^{-3} = 26,447 \text{ мм}.$$

Одностороннюю толщину изоляции в пазу [1, с.77]

$$b_{\text{из}} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу [1, с.365]:

$$S_{\text{из}} = b_{\text{из}} \cdot \left(h_{\text{ш}} + b_1 + b_2 \right) = 0,4 \cdot 10^{-3} \cdot \left(0,02986 + 8,133 \cdot 10^{-3} + 12 \cdot 10^{-3} \right) = 23,899 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников обмотки [1, с.365]:

$$S_{\Pi} = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{н.к.} - S_{уз} = \frac{(7,933 + 11,421)}{2} \cdot 26,447 - 23,899 = 232,04 \text{ мм}^2.$$

Подсчитаем коэффициент заполнения паза [1, с.365]: $d_{уз} = 1,33 \text{ мм}$

$$k_3 = \frac{d_{уз}^2 \cdot U_{\Pi} \cdot n_{эл}}{S_{\Pi}} = \frac{(1,33 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 16 \cdot 6}{232,04 \cdot 10^{-3}} = 0,732$$

Полученное значение k_3 допустимо для механизированной укладки обмотки ($k_3 = 0,72 - 0,74$).

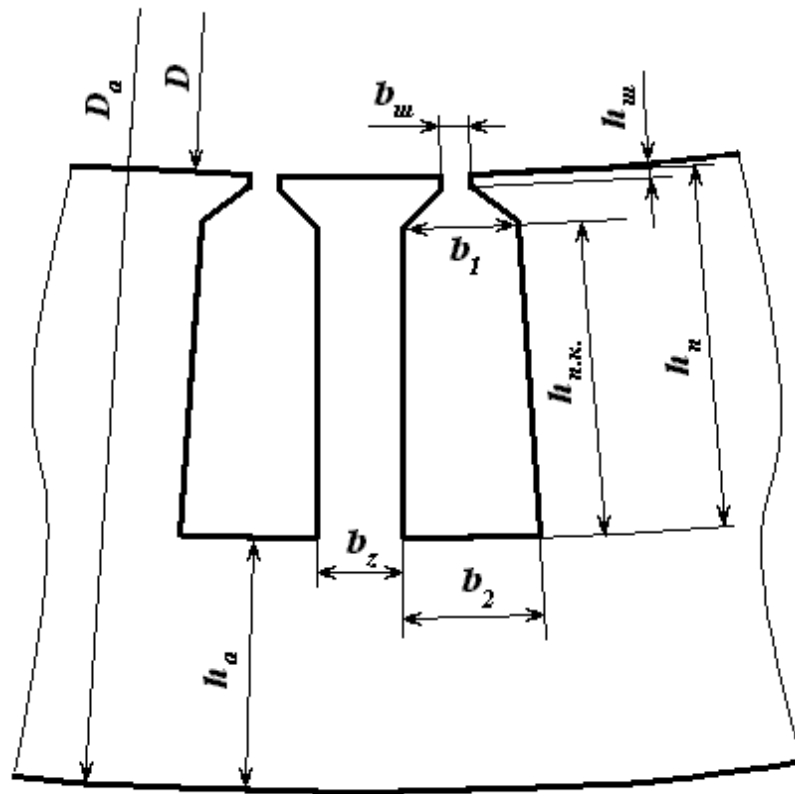


Рисунок 3. Трапецеидальные паза статора

2.3.1 Воздушный зазор [1,с.367], зависит от D:

$$\delta = (0,25 + D) \cdot 10^{-3} = (0,25 + 0,231) \cdot 10^{-3} = 0,481 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Для обеспечения энергетических показателей, достижения рационального использования материалов повышения КПД

Принимаем $\delta = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

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

2.3.2 Число пазов ротора [1,с.374], зависит от $2p$: $Z_2 = 56$ без скоса. Выбор пазов ротора особо важен, так как в поле воздушного зазора машины кроме основной присутствует целый спектр гармоник более высокого порядка, каждая из которых наводит ЭДС в обмотке ротора, поэтому ток в стержнях обмотки имеет сложный гармонический состав. В зависимости от соотношения Z_1 и Z_2 в той или иной степени проявляются синхронные или асинхронные моменты от высших гармоник. Их влияние на момент от первой гармонической приводит к появлению пиков и провалов в результирующей кривой момента. В поле зазора присутствуют также высшие гармоники, порядок которых

определенным образом связан с числами пазов и полюсов машины. Эти зубцовые гармоники вызывают шум и вибрацию при работе двигателя в номинальном режиме. Их влияние особо заметно при малых воздушных зазорах. Наилучшие сочетания Z_1 и Z_2 сведены в таблицу [9-18, 1 с 373]. В двигателях большой мощности иногда выполняют $Z_1 < Z_2$. Это связано с тем чтобы ограничить чрезмерно большой ток в стержнях ротора и увеличить равномерность распределения проводников обмотки по длине расточки. Число пазов статора $Z_1=48$, пазы без скоса.

2.3.3 Внешний диаметр ротора :

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0.231 - 2 \cdot 0.5 \cdot 10^{-3} = 0.23 \text{ м.}$$

2.3.4 Длина магнитопровода ротора : $l_2 = l_\delta = 0.186 \text{ м.}$

2.3.5 Зубцовое деление ротора :

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3.14 \cdot 0.23}{56} = 0.013 \text{ м.}$$

2.3.6 Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник ротора непосредственно насаживается на вал [1,с.385]:

$$D_J = D_B = k_B \cdot D_a = 0.23 \cdot 0.355 = 0.082 \text{ м;}$$

где $k_B = 0.23$ - эмпирический коэффициент [1,с.385] , зависит от h и $2p$.

2.3.7 Ток в стержне ротора [1,с.370]:

$$I_2 = k_i \cdot I_{ном} \cdot v_i ,$$

где k_i - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение I_1 / I_2 : [1,с.370]:

$$k_i = 0.904$$

v_i - коэффициент приведения токов [1,с.374]:

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1}}{Z_2 \cdot k_{ск}} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 64 \cdot 0.92}{44} = 6,309,$$

(пазы ротора делаем без скоса- $k_{ск}=1$)

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot \nu_i$$

$$I_2 = 0.904 \cdot 68.871 \cdot 6.309 = 392,765 \text{ A.}$$

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

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

где $J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A} / \text{м}^2$ – плотность тока в стержнях ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием [1,с.374];

тогда:

$$q_c = \frac{392,765}{2,5 \cdot 10^6} = 1,5711 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

2.3.9 Выбираем пазы ротора грушевидной формы, (рисунок 4.) Форма паза и конструкция обмотки короткозамкнутого ротора определяются требованиями к пусковым характеристиками двигателя и его мощностью. В асинхронных двигателях мощностью до 50 – 60 кВт обычно выполняют грушевидные пазы и литую обмотку из алюминия.

Размеры шлица [1,с.380]: $b_{ш} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h_{ш} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $h'_{ш} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

Выбираем допустимую индукцию для зубцов ротора [1,с.357]

$$B_{Z2} = 1.8 \text{ Тл.}$$

Допустимая ширина зубца [1,с.362]:

$$b_{Z2\text{дон}} = \frac{B_\delta \cdot t_{Z2}}{B_{Z2} \cdot k_c} = \frac{0.759 \cdot 0.013}{1.8 \cdot 0.97} = 5,592 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Размеры паза [1,с.381,382]:

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш}) - Z_2 \cdot b_{Z2\text{дон}}}{\pi + Z_2},$$

$$b_1 = \frac{3.14(0.2292 - 2 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}) - 56 \cdot 5,592 \cdot 10^{-3}}{3.14 + 56} = 6,772 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2} \right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}},$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{6,772 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{56}{3,14} + \frac{3,14}{2} \right) - 4 \cdot 1,5711 \cdot 10^{-4}}{\frac{56}{3,14} - \frac{3,14}{2}}} = 4,007 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$h_1 = \left(b_1 - b_2 \right) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (6,772 - 4,007) \cdot 10^{-3} \cdot \frac{56}{2 \cdot 3,14} = 0,025 \text{ м}.$$

Уточняем ширину зубцов ротора по формулам табл. 9.20

$$b'_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2(h_u + h'_u)b_1}{Z_2} - b_1;$$

$$b'_{z2} = 3,14 \cdot \frac{0,2292 - 2 \cdot (0,7 + 0,3) \cdot 10^{-3} \cdot 6,772 \cdot 10^{-3}}{56} - 6,772 \cdot 10^{-3} = 5,324 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$b''_{z2} = \pi \cdot \frac{D_2 - 2 \cdot h_\pi + b_2}{Z_2} - b_2;$$

$$b''_{z2} = 3,14 \cdot \frac{0,2292 - 2 \cdot 0,03 + 4,007 \cdot 10^{-3}}{56} - 4,007 \cdot 10^{-3} = 5,722 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Принимаем (см рис 9.73,б) $b_1 = 7,9$; $b_2 = 4,2 \text{ мм}$; $h_1 = 22,4 \text{ мм}$;

Полная высота паза:

$$h_{n2} = h'_u + h_u + \frac{b_1}{2} + h_1 + \frac{b_2}{2}$$

$$h_{n2} = (0,3 + 0,7) \cdot 10^{-3} + \frac{6,772 \cdot 10^{-3}}{2} + 0,025 + \frac{4,007 \cdot 10^{-3}}{2} = 29,45 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

2.3.10 Площадь поперечного сечения стержня [1,с.380]:

$$q_c = \frac{\pi}{8} (b_1^2 + b_2^2) + \frac{l}{2} (b_1 + b_2) h_l,$$

$$q_c = \frac{3,14}{8} (7,9^2 + 4,2^2) \cdot 10^{-6} + 0,5 (7,9 + 4,2) \cdot 10^{-3} \cdot 22,4 \cdot 10^{-3} = 166,956 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

Плотность тока в стержне:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{392,765}{166,956 \cdot 10^{-6}} \equiv 2,353 \cdot 10^6 \text{ A /m}^2.$$

2.3.11. Коротко замыкающие кольца:

Ток в короткозамкнутом кольце [1,с.376]:

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta},$$

где Δ – коэффициент [1,с.376]:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2} = 2 \cdot \sin \frac{3,14 \cdot 2}{56} = 0,224,$$

тогда:

$$I_{кл} = \frac{392,765}{0,224} = 1,754 \cdot 10^3 \text{ A}.$$

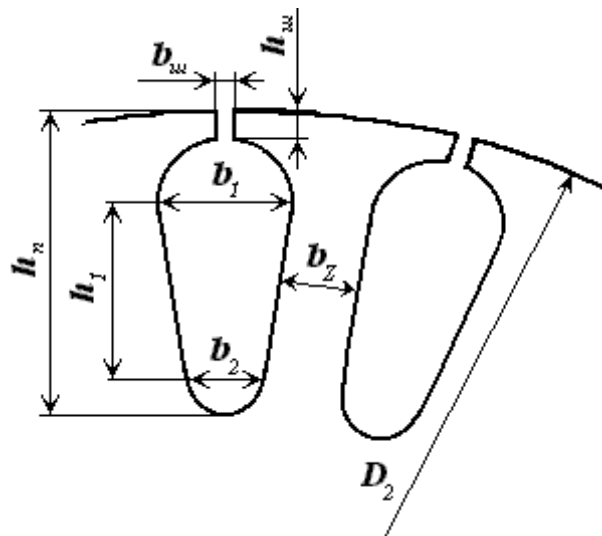


Рисунок 4. Грушевидные пазы ротора

Плотность тока в замыкающих кольцах выбирают в среднем на 15 – 20% меньше, чем в стержнях из-за лучших условий охлаждения колец, а также потому, что в машинах, в которых для улучшения пусковых характеристик используют эффект вытеснения тока, большое сопротивление замыкающих колец снижает кратность увеличения общего сопротивления обмотки ротора при пуске.

$$J_{\kappa\lambda} = 0.85 \cdot J_2 = 0.85 \cdot 2,353 \cdot 10^6 = 2 \cdot 10^6 \text{ A} / \text{M}^2.$$

Площадь поперечного сечения кольца [1,с.376]:

$$q_{\kappa\lambda} = \frac{I_{\kappa\lambda}}{J_{\kappa\lambda}} = \frac{1,754 \cdot 10^3}{2 \cdot 10^6} = 8,771 \cdot 10^{-4} \text{ M}^2.$$

Размеры замыкающих колец [1,с.377]:

$$h_{\kappa\lambda} = 1.25 \cdot h_{\Pi 2} = 1.25 \cdot 29,45 \cdot 10^{-3} = 36,813 \cdot 10^{-3} \text{ M};$$

$$b_{\kappa\lambda} = \frac{q_{\kappa\lambda}}{h_{\kappa\lambda}} = \frac{8,771 \cdot 10^{-4}}{36,813 \cdot 10^{-3}} = 22,112 \cdot 10^{-3} \text{ M};$$

$$D_{\kappa\lambda, \text{cp}} = D_2 - h_{\kappa\lambda} = 0.2292 - 36,813 \cdot 10^{-3} = 192,338 \cdot 10^{-3} \text{ M}.$$

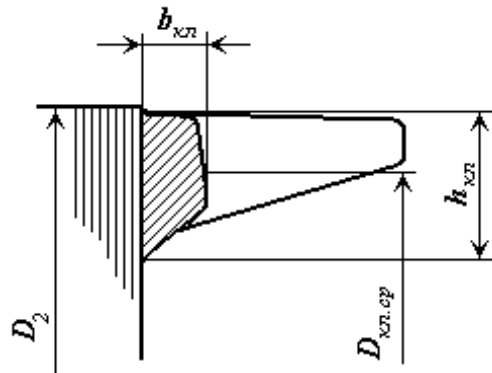


Рисунок 5. Размеры замыкающих колец короткозамкнутого ротора

2.2 Расчёт магнитной цепи

2.4.1 Магнитопровод из стали 2013; толщина листов 0.5 мм.

Магнитное напряжение воздушного зазора [1,с.386]:

$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta}$, где k_{δ} – коэффициент воздушного зазора [1,с.386]:

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

μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

$$\text{где } \gamma_1 = \frac{b_{u1}/\delta^2}{5 + b_{u1}/\delta} = \frac{3,7 \cdot 10^{-3}/0,5 \cdot 10^{-3}^2}{5 + 3,7 \cdot 10^{-3}/0,5 \cdot 10^{-3}} = 4,41,$$

тогда:

$$k_{\delta} = \frac{0,015}{0,015 - 4,41 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 1,17$$

тогда:

$$F_{\delta} = \frac{2}{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} \cdot 0,759 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,17 = 707 \text{ А.}$$

2.4.2 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны статора прежде найдём индукцию в них [1,с.387]:

$$B'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1} \cdot l_{\delta}}{b_{z1} \cdot l_{cm1} \cdot k_{c1}} = \frac{0,759 \cdot 0,015 \cdot 0,186}{7,39 \cdot 10^{-3} \cdot 0,186 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ Тл.}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора [1,с.387]:

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

h_{z1} - высота зубца, $h_{z1} = h_{II} = 0,03 \text{ м}$;

H_{z1} – напряжение зубцовой зоны статора [1,с.698]

$$H_{z1} = 850 \text{ А/м, для } B_{z1} = 1,6 \text{ Тл.}$$

тогда:

$$F_{z1} = 2 \cdot 0.03 \cdot 850 = 50,7 \text{ A}.$$

2.4.3 Для определения магнитного напряжения зубцовой зоны ротора прежде найдём индукцию в них [1,с.387]:

$$B'_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2} \cdot l_{\partial}}{b_{z2} \cdot k_{c1} \cdot l_{cc1}} = \frac{0.759 \cdot 0.013 \cdot 0.186}{4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97 \cdot 0.186} = 2.141 \text{ Тл}$$

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

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2},$$

$$h_{z2} = h_{n2} - 0,1 \cdot b_2 \text{ высота зубца } h_{z2} = 29,45 \cdot 10^{-3} - 0,1 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} = 0,029 \text{ м}$$

H_{z2} – напряжение зубцовой зоны ротора [1,с.698]

$$H_{z2} = 6360 \text{ А /м, для } B_{z2} = 2,141 \text{ Тл.}$$

тогда:

$$F_{z2} = 2 \cdot 29,03 \cdot 10^{-3} \cdot 6360 = 369 \text{ А}.$$

2.4.4 Коэффициент насыщения зубцовой зоны [1,с.694]:

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{50,7 + 369}{707} = 1,19$$

Если $k_z > 1.5 - 1.6$, имеет место чрезмерное насыщение зубцовой зоны; если $k_z < 1.2$, то зубцовая зона мало использована или воздушный зазор взят слишком большим. В данном расчёте коэффициент насыщения зубцовой зоны входит в диапазон рекомендуемых значений.

2.4.5 Магнитное напряжение ярма статора. Предварительно найдём длину средней магнитной силовой линии в ярме [1,с.394]:

$$L_a = \pi \cdot \frac{D_a - h_a}{2 \cdot p} = 3.14 \cdot \frac{0.355 - 0.032}{2 \cdot 2} = 0.254 \text{ м},$$

Индукция в ярме статора [1,с.394]:

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0,016}{2 \cdot 0,032 \cdot 0,186 \cdot 0,97} = 1,4 \text{ Тл},$$

Напряжённость поля ярма статора при индукции [1,с.697],

$$B_a = 1,4 \text{ Тл}, \quad H_a = 400 \text{ А/м},$$

тогда магнитное напряжение:

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,254 \cdot 400 = 101,6 \text{ А}.$$

2.4.6 Магнитное напряжение ярма ротора. Рассчитаем длину ярма ротора [1,с.395]: ($D_\delta = D_j = 0,082$)

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{\Pi 2} = \frac{0,229 - 0,082}{2} - 29,45 \cdot 10^{-3} = 0,044 \text{ м}.$$

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

$$L_j = \pi \frac{D_j + h_j}{2 \cdot p} = 3,14 \frac{0,082 + 0,044}{2 \cdot 2} = 0,099 \text{ м}.$$

В двигателях с непосредственной посадкой сердечника ротора на вал часть силовых магнитных линий замыкаются через вал, поэтому расчетную высоту ярма ротора, м, определяют для 4-х полюсных машин при $0,75 \cdot (0,5 \cdot D_2 - h_{\Pi 2}) < D$ по формуле [1,с.395]:

$$h'_j = \frac{2+p}{3,2p} \left(\frac{D_2}{2} - h_{\Pi 2} \cdot 10^{-3} \right) = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} \cdot \left(\frac{0,229}{2} - 29,45 \cdot 10^{-3} \right) = 0,053.$$

Индукция в ярме ротора [1,с.395]:

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_\delta \cdot k_c} = \frac{0,016}{2 \cdot 0,053 \cdot 0,186 \cdot 0,97} = 0,85 \text{ Тл}.$$

Напряжённость поля ярма ротора при индукции $B_j = 0,849 \text{ Тл}$ [1,с.697]

$H_j = 138 \text{ А/м}$, тогда магнитное напряжение:

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.099 \cdot 138 = 13,651 \text{ A}.$$

2.4.7 Магнитное напряжение на пару полюсов [1,с.396]:

$$F_y = F_\delta + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 707 + 50,7 + 369 + 101,6 + 13,65 = 1241 \text{ A}.$$

2.4.8 Коэффициент насыщения магнитной цепи [1,с.396]:

$$k_\mu = \frac{F_y}{F_\delta} = \frac{958}{707} = 1,4$$

Намагничивающий ток [1,с.396]:

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_y}{0.9 \cdot m \cdot w_1 \cdot K_{об1}} = \frac{2 \cdot 1241}{0.9 \cdot 3 \cdot 64 \cdot 0.92} = 15,7 \text{ A}.$$

Выразим намагничивающий ток в долях номинального тока двигателя [1,с.396]:

$$I_{\mu^*} = \frac{I_\mu}{I_{ном}} = \frac{15,7}{68,871} = 0.22.$$

Относительное значение намагничивающего тока служит определённым критерием правильности выбора и расчёта размеров и обмотки двигателя. Если $I_{\mu^*} < 0.2 \div 0.18$, то это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Такой двигатель может иметь высокие КПД и $\cos\varphi$, но плохие показатели расхода материалов на единицу мощности, большую массу и габариты. Если $I_{\mu^*} > 0.3 \div 0.35$ то это означает, что либо его габариты взяты меньшими, чем следовало, либо неправильно выбраны размерные соотношения участков магнитопровода. Двигатель будет иметь низкие КПД и $\cos\varphi$.

2.5 Параметры рабочего режима

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

2.5.1 Определим среднюю ширину катушки [1,с.399]:

$$b_{\text{кат}} = \pi \cdot \frac{(D + h_{\text{пл}})}{2 \cdot p} \cdot \beta = 3.14 \cdot \frac{(0.231 + 0.03)}{2 \cdot 2} = 0,205 \text{ м},$$

Длина вылета лобовой части катушки [1,с.399]:

$$l_{\text{выл}} = k_{\text{выл}} \cdot b_{\text{кат}} + B,$$

где $k_{\text{выл}}$ - коэффициент, зависит от числа полюсов [1,с.399], для не изолированных лентой лобовых частей примем при $2p = 4$, $k_{\text{выл}} = 0.4$;

B – длина вылета прямолинейной части катушек из паза [1,с.399]:

$B = 0.01 \text{ м}$ – для насыпной обмотки,

тогда:

$$l_{\text{выл}} = 0.4 \cdot 0.205 + 0.01 = 0.092 \text{ м},$$

Длина пазовой части равна конструктивной длине сердечников машины:

$$l_{\text{п}} = l_{\delta} = 0.186 \text{ м}$$

Длина лобовой части насыпной обмотки [1,с.398]:

$$l_{\text{л}} = k_{\text{л}} \cdot b_{\text{кат}} + 2 \cdot B,$$

где $k_{\text{л}}$ - коэффициент, зависит от числа полюсов [1,с.399], для не изолированных лентой лобовых частей $k_{\text{л}} = 1.3$

$$l_{\text{л}} = 1.3 \cdot 0.205 + 2 \cdot 0.01 = 0.286 \text{ м},$$

Средняя длина витка [1,с.398]:

$$l_{\text{ср}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{л}} + l_{\text{л}} = 2 \cdot 3.1416 \cdot 0.186 + 0.286 = 0.945 \text{ м}$$

Общая длина проводников фазы обмотки [1,с.398]:

$$L_{1\text{ср}} = l_{\text{ср}} \cdot w_1 = 0.945 \cdot 64 = 60,453 \text{ м}$$

2.5.2 Активное сопротивление обмотки статора [1,с.397]:

$$r_1 = k_R \cdot \rho_{115} \cdot \frac{L_{1\text{ср}}}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 1 \cdot \frac{10^{-6} \cdot 60,453}{41 \cdot 6,791 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 0,109 \text{ Ом},$$

где $\rho_{115} = 10^{-6} / 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - удельное сопротивление меди при температуре + 115 °С;

коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока, $k_R = 1$ [1,с.398]

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора:

$$r_{1*} = r_1 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 0,109 \cdot \frac{68,871}{220} = 0.034 \text{ о.е}$$

2.5.3 Сопротивление стержня обмотки ротора [1,с.406]:

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{l_2}{q_c} = \frac{10^{-6} \cdot 0.186}{20.5 \cdot 166,956} = 5,44 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

где $\rho_{115} = 10^{-6} / 20.5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ - удельное сопротивление литой алюминиевой обмотки ротора при температуре плюс 115 °С

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключённого между двумя соседними стержнями [1,с.406]:

$$r_{\text{кл}} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot q_{\text{кл}}} = \frac{10^{-6} \cdot 3.14 \cdot 192,338 \cdot 10^{-3}}{20.5 \cdot 56 \cdot 814} = 6,466 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}$$

2.5.4 Активное сопротивление фазы обмотки ротора [1,с.406]:

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 5,44 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 6,466 \cdot 10^{-7}}{0,224^2} = 8,019 \cdot 10^{-5} \text{ Ом},$$

Для дальнейших расчётов полученное сопротивление фазы обмотки ротора приводят к числу витков обмотки статора [1,с.406]:

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2^2} = 6,591 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (64 \cdot 0,92)^2}{56^2} = 0,06 \text{ Ом},$$

Относительное значение [1,с.411]:

$$r'_{2*} = r'_2 \cdot \frac{I_{ном}}{U_{ном}} = 0,06 \cdot \frac{68,871}{220} = 0,019 \text{ о.е.}$$

2.5.5 Коэффициенты магнитной проводимости.

k_β - коэффициент зависящий от укорочения шага обмотки т.к. укорочение отсутствует то выбираем $k_\beta = 1$ [1,с.403]:

$$h_2 = h_{нк} \cdot 10^3 - 2 \cdot b_{из}$$

$$h_2 = 0,027 \cdot 10^3 - 2 \cdot 0,4 = 25,847 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$h_k = 0,5 \cdot \tau_1 - b_{ш}$$

$$h_k = 0,5 \cdot 6,9 - 1,5 = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния [1,с.403]:

$$\lambda_{п1} = \frac{h_2 \cdot k_\beta}{3 \cdot b_1} + \left(\frac{h_1}{b_1} \cdot \frac{3 \cdot h_k}{b_1 + 2 \cdot b_{ш}} + \frac{h_{ш}}{b_{ш}} \right) \cdot k'_\beta,$$

$$\lambda_{п1} = \frac{25,847 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{3 \cdot 7,9} + \left(\frac{0}{7,9} \cdot \frac{3 \cdot 3,2 \cdot 10^{-3}}{7,9 + 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}} \right) = 2,438,$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1,с.403]:

$$\lambda_{л1} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_\delta} \cdot \tau_1 - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau_1 = 0,34 \cdot \frac{4}{0,186} \cdot 6,286 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,181 = 1,242$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1,с.407]:

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi$$

где ξ – коэффициент [1,с.407]:

$$\xi = 2 \cdot k'_{ск} \cdot k_{\beta} - K_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 \cdot \left(1 + \beta_{ск}^2 \right) = 2 \cdot 1,4 \cdot 1 - 0,92^2 \cdot \left(\frac{0,013}{0,015} \right)^2 = 2,187$$

пазы без скоса $\beta_{ск} = 0$, $k'_{ск} = 1$, [1,с.405], зависит от $t_{z1}/t_{z2}=1,088$

тогда:

$$\lambda_{д1} = \frac{0,015 \cdot 10^3}{12 \cdot 0,8 \cdot 1,33} \cdot 2,187 = 3,035$$

2.5.6 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора [1,с.402]:

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot \left(\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1} \right),$$

$$X_1 = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{64}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,186}{2 \cdot 4} \cdot \left(4,438 + 1,242 + 3,035 \right) = 0,506 \text{ Ом}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки статора [с.205]:

$$x_{1*} = X_1 \cdot \frac{I_{1ном}}{U_{1ном}} = 0,506 \cdot \frac{68,871}{220} = 0,158 \text{ о.е.},$$

2.5.7 Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния ротора [1,с.407]:

$$\lambda_{п2} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{uu}}{2 \cdot b_1} \right] + \frac{h_{uu}}{b_{uu}},$$

где $h_0 = h_1 + 0,4 \cdot b_2 \text{ м}$ $h_0 = 22,4 + 0,4 \cdot 4,2 = 24,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

$$\lambda_{\pi 2} = \left[\frac{24.08 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 7.9 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(1 - \frac{3.14 \cdot 7.9 \cdot 10^{-6}}{8 \cdot 166.956 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7.9 \cdot 10^{-3}} \right] + \frac{0.7 \cdot 10^{-3}}{1.5 \cdot 10^{-3}} = 2.627$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния [1, с.409]:

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{2.3 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{Z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \cdot \lg \left[\frac{4.7 \cdot D_{\text{кл.ср}}}{2 \cdot h_{\text{кл}} + b_{\text{кл}}} \right],$$

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{2.3 \cdot 192.338 \cdot 10^{-3}}{56 \cdot 0.186 \cdot 0.224^2} \cdot \lg \left[\frac{4.7 \cdot 192.338 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 36.813 \cdot 10^{-3} + 22.112 \cdot 10^{-3}} \right] = 0.886$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния [1, с.409]:

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi,$$

где $\xi = l$

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{0.013 \cdot 10^3}{12 \cdot 0.8 \cdot 1.133} \cdot 1 = 1.181$$

2.5.8 Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора [с1, с.407]:

$$X_2 = 7.9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2}) \cdot 10^{-6} = 7.9 \cdot 50 \cdot 0.186 \cdot (2.627 + 0.886 + 1.181) = 3.453 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}.$$

Приводим X_2 к числу витков статора [с1, с.409]:

$$x'_2 = X_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot K_{\text{об1}})^2}{Z_2} = 3.453 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (64 \cdot 0.92)^2}{56} = 0.257 \text{ Ом}$$

Относительное значение [с1, с.411]:

$$x'_{2*} = x'_2 \cdot \frac{I_{1\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} = 0.257 \cdot \frac{68.871}{220} = 0.08 \text{ о.е.},$$

Для удобства сопоставления параметров отдельных машин и упрощения расчёта характеристик параметры асинхронных машин выражают в

относительных единицах, принимая за базисные значения номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток.

2.6 Расчёт потерь

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

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

2.6.1 Основные потери в стали статора асинхронной машины [с1,с.412]:

$$P_{ст.осн} = p_{1.0/50} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot \left(k_{\partial a} \cdot B_a^2 \cdot m_a + k_{\partial z} \cdot B_{zcp}^2 \cdot m_{z1} \right),$$

где $p_{1.0 / 50}$ - удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц. [с1,с.412]: сталь 2013 толщиной 0,5 мм;

$$p_{1.0 / 50} = 2.5 \text{ Вт} / \text{кг};$$

β – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания, для большинства сталей $\beta = 1.4$;

$k_{\partial a}$ и $k_{\partial z}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов. $k_{\partial a} = 1.6$, $k_{\partial z} = 1.8$,

m_a, m_{z1} - масса стали ярма и зубцов статора [с1,с.412]:

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

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1,cp} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c,$$

где γ_c – удельная масса стали; в расчётах принимают $\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3 \text{ кг} / \text{м}^3$ [с1,с.412],

$$m_a = 3.14 \cdot (3.55 - 0.032) \cdot 0.032 \cdot 0.186 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 46,082 \text{ кг},$$

$$m_{z1} = 29 \cdot 7,39 \cdot 10^{-3} \cdot 48 \cdot 0.186 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 14,493 \text{ кг},$$

тогда:

$$P_{ст.осн} = 2.5 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1.4} \cdot (6 \cdot 1.4^2 \cdot 46,082 + 1.8 \cdot 1.6^2 \cdot 14,493) = 528,235 \text{ Вт},$$

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

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta, \text{ [с1,с.413]}$$

где $\beta_{02} = f(b_{u1} / \delta)$; $b_{u1} / \delta = 1,5 \cdot 10^{-3} / 0,8 \cdot 10^{-3} = 1,875$ – по данному значению коэффициент

$$\beta_{02} = 0.09 \text{ [с1,с.413]},$$

$$B_{02} = 0.09 \cdot 1.133 \cdot 0.759 = 0.077 \text{ Тл на } 1 \text{ м}^2 \text{ поверхности}$$

Поверхностные потери в роторе [с1,с.412]:

$$P_{нов2} = p_{нов2} \cdot (Z_2 - b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta$$

где $p_{нов2}$ – удельные поверхностные потери, т.е. потери, в поверхностном слое коронок зубцов ротора [с1,с.413]:

$$p_{нов2} = 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.077 \cdot t_{z1} \cdot 10^3),$$

где k_{02} – коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери [1,стр.413], $k_{02} = 1.5$;

$$p_{нов2} = 0.5 \cdot 1.5 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.077 \cdot 0,015 \cdot 10^3) = 19,835 \text{ Вт} / \text{м}^2,$$

тогда:

$$P_{нов2} = 19,835 \cdot 0,013 - 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 56 \cdot 0,186 = 2,349 \text{ Вт},$$

2.6.3 Для определения пульсационных потерь необходимо определить массу ротора [1,стр.414]:

$$m_{z2} = Z_2 \cdot h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot l_\delta \cdot k_c \cdot \gamma_c = 56 \cdot 29,03 \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,186 \cdot 0,97 \cdot 7800 = 9,619 \text{ кг},$$

а также амплитуду пульсаций индукции в среднем сечении зубцов [1,стр.414]:

$$B_{пуль2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{2,222 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,013} \cdot 1,8 = 0,124 \text{ Тл},$$

тогда пульсационные потери в зубцах ротора [1,стр.414]:

$$P_{пуль2} = 0,11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{пуль2} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0,11 \cdot \left(\frac{48 \cdot 1500}{1000} \cdot 0,124 \right)^2 \cdot 9,619 = 84,984 \text{ Вт}$$

2.6.4 Сумма добавочных потерь в стали [1,стр.415]:

$$P_{ст.доб} = P_{нов2} + P_{пуль2} = 2,349 + 84,984 = 87,332 \text{ Вт}$$

2.6.5 Полные потери в стали [1,стр.414]:

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 528,235 + 87,332 = 615,567 \text{ Вт}$$

2.6.6 Механические потери [1,стр.414]:

$$P_{мех} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10} \right)^2 \cdot D_a^4 = 0,838 \cdot \left(\frac{1500}{10} \right)^2 \cdot 0,355^4 = 299,639 \text{ Вт},$$

где K_T - коэффициент, для двигателей с $2 \cdot p = 4$ равен [1,стр.416]

$$K_T = 1,3 \cdot (1 - D_a) = 1,3 \cdot (1 - 0,355) = 0,838$$

2.6.7 Для определения тока холостого хода двигателя принимают, что потери на трение и вентиляцию и потери в стали при холостом ходе такие же, как и при номинальном режиме. При этом условии активная составляющая тока холостого хода: [1,стр.417]:

$$I_{х.х.а} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{элх.х}}{m \cdot U_{ном}},$$

где $P_{\text{эл.х.х}}$ – электрические потери в статоре при холостом ходе [1,стр.417]:

$$P_{\text{эл.х.х}} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 20,52^2 \cdot 0,109 = 137,138 \text{ Вт},$$

тогда:

$$I_{\text{х.х.а}} = \frac{P_{\text{см}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{эл.х.х}}}{m \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{615,567 + 299,639 + 137,138}{3 \cdot 220} = 1,594 \text{ А},$$

тогда ток холостого хода двигателя [1,стр.417]:

$$I_{\text{х.х}} \approx \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{1,594^2 + 20,52^2} = 20,581 \text{ А}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе [1,стр.417]:

$$\cos \varphi_{\text{х.х}} = \frac{I_{\text{х.х.а}}}{I_{\text{х.х}}} = \frac{1,594}{20,581} = 0,077$$

2.7 Расчёт рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости $P_1, I_1, \cos \varphi, \eta, s_1 = f(P_2)$. Рабочие характеристики можно рассчитать по круговой диаграмме или аналитическим методом. Расчет по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчета. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях. Расчет характеристик проводят, задаваясь значениями скольжений в диапазоне $s = (0,2 \dots 1,5)s_{ном}$. Номинальное скольжение можно предварительно взять при $s_{ном} = r'_2$. Для построения характеристик достаточно рассчитать значения требуемых величин для пяти-шести различных скольжений, выбранных в указанном диапазоне примерно через равные интервалы.

2.7.1 Сопротивление схемы замещения [1, стр.410]:

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн}}{m \cdot I_\mu^2} = \frac{528,235}{3 \cdot 20,52^2} = 0,418 \text{ Ом.}$$

2.7.2 Сопротивление взаимной индукции обмоток статора [1, стр.410]:

$$x_{12} = \frac{U_{1ном}}{I_\mu} - x_1 = \frac{220}{20,52} - 0,506 = 10,216 \text{ Ом,}$$

Активная и реактивная составляющая коэффициента C_1 определяется по [9.223]

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{0,506}{10,216} = 1,05$$

$$\gamma = \arctg \left[\frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (c_1 + x_{12})} \right] = \arctg \left[\frac{0,109 \cdot 10,216 - 0,418 \cdot 0,506}{0,418 \cdot (1 + 0,418) + 10,216 \cdot (1,05 + 10,216)} \right]$$

$\gamma = 0,469$ градусов $\gamma < 1$ градуса.

2.7.3 Активная составляющая тока синхронного холостого хода замыкания [1, стр.420]:

$$I_{0a} = \frac{P_{ст.осн} + 3 \cdot I_\mu^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{528,235 + 3 \cdot 20,52^2 \cdot 0,109}{3 \cdot 220} = 1,008 \text{ А.}$$

2.7.4 Коэффициенты для расчёта пусковых характеристик [1, стр.420]:

Если $\gamma \leq 1$, то можно использовать приближенный метод, так как в этом случае:

$$a' = c_1^2 \quad a = c_1 \cdot r_1 \quad a' = 1.101 \quad a = 0.114 \text{ Ом}$$

$$b' = 0 \quad b = c_1 \cdot x_1' + c_1 \cdot x_2'$$

$$b = c_1 \cdot x_1' + c_1 \cdot x_2' = 1,05 \cdot 0,506 + 1,05 \cdot 0,257 = 0,813 \text{ Ом}$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{ст} + P_{мех} = 615.567 + 299.639 = 915.207 \text{ Вт.}$$

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений указанных в таблице 1. Рабочие характеристики приведены в ПРИЛОЖЕНИИ Б

2.8 Расчёт пусковых характеристик

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

Определим ряд величин для нахождения активного сопротивления обмотки ротора.

Проведём расчёт для момента пуска $s = 1$.

2.8.1 Параметры с учетом вытеснения тока [1,стр.427] для литой алюминиевой обмотки при температуре $+115^{\circ}\text{C}$:

$$\xi = 63,61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 63,61 \cdot 28,86 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1} = 1,836$$

$$h_c = h_n - (h_{ui} + h'_{ui}) = 0,02986 - (0,3 + 0,7) \cdot 10^{-3} = 28,86 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

где h_c - высота стержня в пазу,

для $\xi = 1,836$ [1,стр.428], $\varphi = 0,7$.

Глубина проникновения тока определяется по [1,стр.427]:

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{28,86 \cdot 10^{-3}}{1 + 0,7} = 16,976 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Найдём площадь сечения обмотки ротора на глубине h_r , для этого предварительно определим следующую величину [1,стр.427]:

$$b_r = b_1 - \frac{b_1 - b_2}{h_1} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right),$$

$$b_r = 7,9 \cdot 10^{-3} - \frac{(7,9 - 4,2) \cdot 10^{-3}}{22,4 \cdot 10^{-3}} \cdot \left(16,976 \cdot 10^{-3} - \frac{7,9 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 5,748 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Площадь сечения глубины проникновения определяется по [1,стр.429]:

$$q_r = \frac{\pi \cdot b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \cdot \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right),$$

$$q_r = \frac{3,14 \cdot 7,9^2 \cdot 10^{-3}}{8} + \frac{(7,9 + 5,748) \cdot 10^{-3}}{2} \cdot \left(16,976 \cdot 10^{-3} - \frac{7,9 \cdot 10^{-3}}{2} \right) = 113,403 \cdot 10^{-3} \quad \text{м}^2$$

Коэффициент k_r определяется по отношению площадей всего сечения стержня и сечения ограниченного высотой h_r по [1,стр.429]:

$$k_r = \frac{q_c}{q_r} = \frac{166,956 \cdot 10^{-3}}{113,403 \cdot 10^{-3}} = 1,472$$

Коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока [1,стр.429]:

$$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} \cdot (k_r - 1) = 1 + \frac{5,44 \cdot 10^{-5}}{8,019 \cdot 10^{-5}} \cdot (1,472 - 1) = 1,32$$

Приведённое активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом вытеснения тока

$$r'_{2\xi} = r'_2 \cdot K_R = 0,06 \cdot 1,32 = 0,079 \quad \text{Ом}$$

2.8.2 Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока.

Для определения коэффициента, характеризующего изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока, найдём коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учётом этого эффекта:

$$\lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta \lambda_{\Pi 2\xi} = 2,627 - 0,235 = 2,392$$

$$\text{где } \Delta \lambda_{\Pi 2\xi} = \lambda'_{\Pi 2} \cdot (1 - k_D); k_D = \varphi' = 0,82;$$

$$\Delta \lambda_{\Pi 2\xi} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_m}{2 \cdot b_1} \right] \cdot (1 - k_D),$$

$$\Delta\lambda_{\Pi 2\xi} = \left[\frac{24,08}{3 \cdot 7,9 \cdot 10^{-3}} \left(1 - \frac{3,14 \cdot (7,9 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 166,956 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 7,9 \cdot 10^{-3}} \right] \cdot (1 - 0,82) = 0,235$$

Тогда коэффициент, характеризующий изменение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока [1,стр.431]:

$$K_x = \frac{\lambda_{\Pi 2\xi} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{\Pi 2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{\Pi 2}} = \frac{2,392 + 0,886 + 1,181}{2,627 + 0,886 + 1,181} = 0,95$$

Приведенное индуктивное сопротивление с учетом эффекта вытеснения тока находится по [1,стр.431]

$$x'_{2\xi} = x'_2 \cdot K_x = 0,257 \cdot 0,95 = 0,244$$

Пусковые параметры определяются по [1,стр.437]

$$x_{12\Pi} = x_{12} \cdot k_\mu = 10,216 \cdot 1,488 = 15,203 \text{ Ом}$$

При этих допущениях коэффициент c_1 [1,стр.437]:

$$c_{1\Pi} = 1 + \frac{x_1}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{0,506}{15,203} = 1,033$$

2.8.3 Для расчёта токов с учётом влияния эффекта вытеснения тока, прежде найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1,стр.437]:

$$R_\Pi = r_1 + c_{1\Pi} \cdot r'_{2\xi} / s = 0,109 + 1,033 \cdot 0,079 / 1 = 0,19 \text{ Ом}$$

$$X_\Pi = x_1 + c_{1\Pi} \cdot x'_{2\xi} = 0,506 + 1,033 \cdot 0,244 = 0,758 \text{ Ом}$$

Тогда ток в обмотке ротора [1,стр.437]:

$$I'_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_\Pi^2 + X_\Pi^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,19^2 + 0,758^2}} = 281,695 \text{ А}$$

Ток в обмотке статора [1,стр.437]:

$$I_1 = I'_2 \cdot \frac{\sqrt{R_\Pi^2 + (X_\Pi + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}} = 281,695 \cdot \frac{\sqrt{0,19^2 + (0,758 + 15,203)^2}}{1,033 \cdot 15,203} = 286,23 \text{ А}$$

Для непосредственного расчёта пусковых характеристик с учётом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния необходимо

задаться предполагаемой кратностью увеличения тока $k_{нас}$, обусловленной уменьшением индуктивного сопротивления из-за насыщения зубцовой зоны. Ориентировочно для расчёта пусковых режимов принимают

$$k_{нас} = 1.25 - 1.4 \text{ [1, стр. 432] .}$$

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

2.8.4 Определим среднюю МДС обмотки, отнесенную к одному пазу обмотки статора [1, стр. 432]:

$$F_{п.ср} = 0.7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot U_{п.}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right),$$

где $k_{y1} = 1$ - коэффициент укорочения,

тогда:

$$F_{п.ср} = 0.7 \cdot \frac{286,23 \cdot 1.35 \cdot 15,789}{2} \cdot \left(1 + 1 \cdot 0.92 \cdot \frac{48}{56} \right) = 3,87 \cdot 10^3 \text{ A}$$

Для расчёта фиктивной индукции потока рассеяния в воздушном зазоре определим следующий коэффициент [1, стр. 433]:

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{0.8 \cdot 10^{-3}}{(0,015 + 0,013)}} = 1,063,$$

тогда фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре [1, стр. 433]:

$$B_{\phi\delta} = \frac{F_{п.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{3870 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 0.8 \cdot 10^{-3} \cdot 1,063} = 2,845 \text{ Тл}$$

По полученному значению индукции определяем отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины, характеризующее коэффициентом K_{δ} , значение которого находят по кривой [1, стр. 432]: $K_{\delta} = 0,8$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учетом влияния насыщения:

$$c_1 = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k_s) = (0.015 - 3.7 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0.75) = 2.851$$

Вызванное насыщением от полей рассеяния уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния для полужакрытого паза [с.220, формула 6 258]:

$$h_k = \frac{b_1 - b_{u1}}{2} = \frac{(7.9 - 3.7) \cdot 10^{-3}}{2} = 2.1 \text{ мм}$$

$$\Delta \lambda_{\Pi 1 \text{нас}} = \frac{h_{u1} + 0.58 \cdot h_k}{b_{u1}} \cdot \frac{c_{\sigma 1}}{c_{\sigma 1} + 1.5 \cdot b_{u1}},$$

$$\Delta \lambda_{\Pi 1 \text{нас}} = \frac{1 + 0.58 \cdot 2.1 \cdot 10^{-3}}{3.7 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2.281}{2.281 + 1.5 \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}} = 0.175$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора [1, стр.434]:

$$\lambda_{\Pi 1 \text{нас}} = \lambda_{\Pi 1} - \Delta \lambda_{\Pi 1 \text{нас}} = 2.438 - 0.175 = 2.263$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, стр.434]:

$$\lambda_{Д1 \text{нас}} = \lambda_{Д1} \cdot K_s = 3.035 \cdot 0.75 = 2.276$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учётом влияния насыщения [1, стр.434]:

$$x_{1 \text{нас}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\Pi 1 \text{нас}} + \lambda_{Д1 \text{нас}} + \lambda_{л1}}{\lambda_{\Pi 1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{л1}} = 0.506 \cdot \frac{2.263 + 2.428 + 1.242}{2.438 + 3.035 + 1.242} = 0.447 \text{ Ом}$$

Далее рассчитываем значение дополнительного эквивалентного раскрытия пазов ротора, магнитное напряжение которого будет эквивалентно МДС насыщенных участков усиков зубцов [1, стр.433]:

$$c_{\varphi 2} = (c_{\varphi 2} - b_{u2}) \cdot (-K_{\delta}) = (0,013 - 1,5 \cdot 10^{-3}) \cdot (-0,75) = 2,839$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учётом влияния насыщения [1,стр.434]:

$$\Delta \lambda_{\Pi 2 \text{ нас}} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{\varphi 2}}{c_{\varphi 2} + b_{u2}} = \frac{1 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{2,839}{2,839 + 1,5 \cdot 10^{-3}} = 0,436$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для ротора [1,стр.434]:

$$\lambda_{\Pi 2 \xi \text{ нас}} = \lambda_{\Pi 2 \xi} - \Delta \lambda_{\Pi 2 \text{ нас}} = 2,392 - 0,436 = 1,956$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения [1,стр.434]:

$$\lambda_{\Delta 2 \text{ нас}} = \lambda_{\Delta 2} \cdot K_{\delta} = 1,181 \cdot 0,75 = 0,886$$

Приведённое индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1,стр.434]:

$$x'_{2 \xi \text{ нас}} = x'_{2} \cdot \frac{\lambda_{\Pi 2 \xi \text{ нас}} + \lambda_{\Delta 2 \text{ нас}} + \lambda_{\Delta 2}}{\lambda_{\Delta 2} + \lambda_{\Delta 2} + \lambda_{\Pi 2}} = 0,257 \cdot \frac{1,956 + 0,886 + 0,886}{1,181 + 0,886 + 2,627} = 0,204 \text{ Ом}$$

Уточним коэффициент $c_{1\Pi}$ [1,стр.437]:

$$c_{1\Pi \text{ нас}} = 1 + \frac{x_{1 \text{ нас}}}{x_{12\Pi}} = 1 + \frac{0,447}{15,203} = 1,028$$

2.8.5 Расчёт токов и моментов с учётом влияния вытеснения тока и насыщения.

Найдём активные и реактивные сопротивления из эквивалентной схемы замещения [1,стр.437]:

$$R_{\Pi \text{ нас}} = r_1 + c_{1\Pi \text{ нас}} \cdot r'_{2 \xi} / s = 0,109 + 1,028 \cdot 0,079 / 1 = 0,189 \text{ Ом},$$

$$X_{\Pi \text{ нас}} = x_{1 \text{ нас}} + c_{1\Pi \text{ нас}} \cdot x'_{2 \xi \text{ нас}} = 0,447 + 1,028 \cdot 0,204 = 0,635 \text{ Ом}$$

Ток в обмотке ротора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1,стр.437]:

$$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{Пнас}^2 + X_{Пнас}^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,189^2 + 0,635^2}} = 331,797 \text{ A}$$

Ток в обмотке статора с учётом влияния вытеснения тока и насыщения [1,стр.437]:

$$I_1 = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{Пнас}^2 + (X_{Пнас} + x_{12П})^2}}{c_{1Пнас} \cdot x_{12П}} = 331,797 \cdot \frac{\sqrt{0,189^2 + (0,635 + 15,203)^2}}{1,028 \cdot 15,203} = 336,225 \text{ A}$$

Определим кратность тока и момента при заданном $s = 1$, [1,стр.437]:

$$I_{П*} = I_1 / I_{1ном} = 336,225 / 68,871 = 6,498 \text{ A}$$

$$M_{П*} = \left(\frac{I'_{2п.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{ном}}{s} = \left(\frac{331,797}{65,785} \right)^2 \cdot 1,32 \cdot \frac{0,019}{1} = 1,207$$

Данные расчёта сведены в таблицу 2, а пусковые характеристики представлены на рисунок 6, ПРИЛОЖЕНИЕ В.

2.8.6 Критическое скольжение определяем после расчёта всех точек пусковых характеристик. Значения сопротивлений $x_{1нас}$, $x'_{2\zeta нас}$ возьмём из колонки таблицы 2 выделенной жирным шрифтом.

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{x_{1нас} / c_{1Пнас} + x'_{2\zeta нас}} = \frac{0,06}{0,428 / 1,028 + 0,202} = 0,106$$

Полученное число незначительно отличается от табличного значения, являющимся первоначальным приближением к критической частоте. Расчёт кратности максимального момента показал, что оно почти не отличается от табличного значения. Примем за максимальный момент $M_{max} = 2,275$.

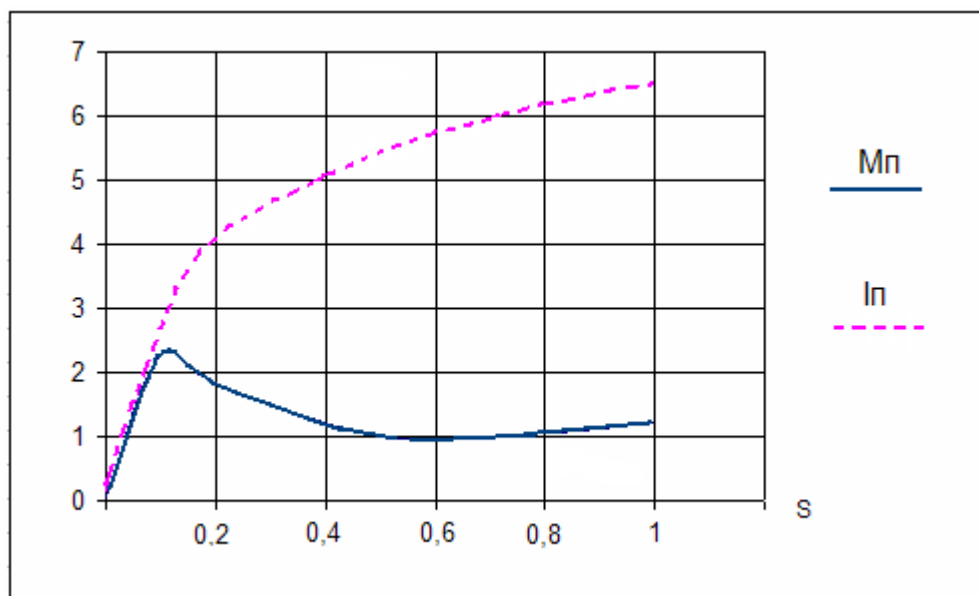


Рисунок 6. Пусковые характеристики двигателя.

3. Тепловой расчёт

Расчёт нагрева проводят, используя значения потерь, полученных для номинального режима, но потери в изолированных обмотках статора несколько увеличивают по сравнению с расчётными, предполагая, что обмотки могут быть нагреты до предельно допустимой для принятого класса изоляции температуры при классе нагревостойкости изоляции F – до плюс 140 °С. При этом коэффициент увеличения потерь k_p по сравнению с полученными для расчётной температуры составит $k_p = \rho_{140} / \rho_{115} = 1.07$.

3.1 Электрические потери в обмотке статора делятся на потери в пазовой части [с.235, формула 6-312]:

$$P'_{\text{эл.п.1}} = k_p \cdot P_{\text{эл.1}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{\text{сп1}}} = 1.07 \cdot 1.52 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 0.186}{0.945} = 646,229 \text{ Вт}$$

и на электрические потери в лобовых частях катушек [с.235, формула 6-313]:

$$P'_{\text{эл.л.1}} = k_p \cdot P_{\text{эл.л.1}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л1}}}{l_{\text{сп1}}} = 1.07 \cdot 1.52 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 0.286}{0.945} = 992,912 \text{ Вт}$$

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя [1, стр.450]:

$$\Delta \nu_{\text{нов1}} = K \cdot \frac{P'_{\text{эл.п.1}} + P_{\text{ст.осн}}}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1},$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности [1, стр.450]], зависит от D_a

$$\alpha_1 = 115 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

K – коэффициент, учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передаётся через станину непосредственно в окружающую среду [1, стр.450], зависит от $2p$, $K = 0,2$

тогда:

$$\Delta v_{\text{пог1}} = 0.2 \cdot \frac{646,229 + 528,235}{3.14 \cdot 0.231 \cdot 0.186 \cdot 115} = 15,116^{\circ} C$$

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора, равный для полузакрытых трапецеидальных пазов [1,стр.451]:

$$\Pi_1 = 2 \cdot h_{\text{н.к.}} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 27 \cdot 10^{-3} + 8,133 \cdot 10^{-3} + 12 \cdot 10^{-3} = 74,133 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

3.2 Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора [1,стр.452]:

$$\Delta v_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{эл.л1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right),$$

где $\lambda_{\text{экв}}$ - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции; для классов нагревостойкости В, F и H $\lambda_{\text{экв}} = 0.16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$,

$\lambda'_{\text{экв}}$ — среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки из эмалированных проводников [1,стр.452],

$$\lambda'_{\text{экв}} = 1,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C}), \text{ зависит от } d/d_{\text{из}},$$

тогда:

$$\Delta v_{\text{из.л1}} = \frac{646,229}{48 \cdot 74,133 \cdot 10^{-3} \cdot 0.186} \cdot \left(\frac{0,4 \cdot 10^{-3}}{0.16} + \frac{(8,133 + 12) \cdot 10^{-3}}{16 \cdot 1,2} \right) = 3,461^{\circ} C$$

3.3 Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей [1,стр.452]:

$$b_{\text{из.л1max}} = 0.05 \text{ мм.}$$

$$\Delta v_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{эл.л1}}}{Z_1 \cdot \Pi_1 \cdot l_{\delta}} \cdot \left(\frac{b_{\text{из.л1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{h_{\Pi}}{12 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right),$$

$$\Delta v_{из.л1} = \frac{992,912}{48 \cdot 74,133 \cdot 10^{-3} \cdot 0.186} \cdot \left(\frac{0,05 \cdot 10^{-3}}{0.16} + \frac{27 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1,2} \right) = 1,067^0 C$$

3.4 Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри двигателя [1,стр.452]:

$$\Delta v_{нов.л1} = \frac{K \cdot P'_{э.л1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot l_{вы.л} \cdot \alpha_1} = \frac{0.2 \cdot 992,912}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.231 \cdot 0.092 \cdot 115} = 12,95^0 C$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри двигателя [с.238, формула 6-321]:

$$\Delta v'_1 = \frac{(\Delta v_{нов.л} + \Delta v_{из.л1}) \cdot 2 \cdot l_{\delta} + (\Delta v_{из.л1} + \Delta v_{нов.л1}) \cdot 2 \cdot l_{\delta}}{l_{cp1}}$$

$$\Delta v'_1 = \frac{(15,116 + 3,461) \cdot 2 \cdot 0.186 + (1,067 + 12,95) \cdot 2 \cdot 0.186}{0.945} = 15,814^0 C$$

3.5 Превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды определяется в предположении, что температура корпуса равна температуре воздуха внутри машины. [1,стр.452]:

$$\Delta v_B = \frac{\sum P'_B}{S_{кор} \cdot \alpha_B},$$

где $\sum P'_B$ - сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя [1,стр.453]:

$$\sum P'_B = \sum P' - (-K) \cdot P'_{э.л.1} + P_{ст.осн} - 0.9 \cdot P_{мех},$$

$$\text{где } \sum P' = \sum P + (-\rho - 1) \cdot P_{э1} + P_{э2} = 3,355 \cdot 10^3 + (-0.07 - 1) \cdot (532 + 0,712) \cdot 10^3 = 3,477 \cdot 10^3$$

Вт, тогда:

$$\sum P'_B = 3,477 \cdot 10^3 - (-0.2) \cdot (46,229 + 528,235) - 0.9 \cdot 299,639 = 2,268 \cdot 10^3 \text{ Вт},$$

$S_{кор}$ - эквивалентная поверхность охлаждения корпуса [1,стр.453]:

$$s_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot l_{выл} = (\pi \cdot 0.14 \cdot 0.355 + 8 \cdot 0.38) \cdot (0.186 + 2 \cdot 0.092) = 1.537 \text{ м}^2$$

где Π_p - условный периметр поперечного сечения рёбер корпуса двигателя [1, стр.453], $\Pi_p = 0.38 \text{ м}$, зависит от h ,

α_B - коэффициент подогрева воздуха, учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины [1, стр.455], $\alpha_B = 24 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, зависит от D_a ,

тогда:

$$\Delta \nu_B = \frac{3,477 \cdot 10^3}{1,537 \cdot 24} = 61,48^\circ \text{C}$$

3.6 Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой окружающей среды [1, стр.453]:

$$\Delta \nu_1 = \Delta \nu'_1 + \Delta \nu_B = 15,814 + 61,48 = 77,294^\circ \text{C}$$

Вывод: тепловой расчет двигателя удовлетворяет требованиям задания.

4. Вентиляционный расчёт

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

4.1 Требуемый для охлаждения расход воздуха [1,стр.456]:

Требуемый для охлаждения расход воздуха по (9.340) $m' = 1.8$

$$\Theta = \frac{k_m \cdot \sum P_B^I}{1100 \Delta \nu_B} = \frac{4.154 \cdot 2.268 \cdot 10^3}{1100 \cdot 61.48} = 0.139 \text{ м}^3/\text{с}$$

По (9.341)

$$k_m = m' \sqrt{\frac{n}{100} D_a} = 1.8 \sqrt{\frac{1500}{100} 0.355} = 4.154$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, по (9.342)

$$\Theta'_B = 0.6 \cdot D_a^3 \frac{n}{100} = 0.6 \cdot 0.355^3 \frac{1500}{100} = 0.403 \text{ м}^3/\text{с}. \quad \Theta'_B > \Theta.$$

Вывод: нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах. Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

5. Механический расчёт

Электрические машины общего назначения в большинстве случаев выполняют с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несёт на себе всю массу вращающихся частей, через него передаётся вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом через ремённую и зубчатую передачу, а также и через муфту на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдержать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал также должен иметь достаточную жёсткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины.

Валы изготавливают из углеродистых сталей, преимущественно сталь 45. Для повышения механических свойств материала его подвергают термической обработке. Методика расчёта взята из [2].

Выбираем муфту МУВП1 – 65, радиус окружности муфты $r = 110 \text{ мм}$

Основные размеры вала выбираем приближённо равными размерам вала серийной модели. Конструкция вала приведена на рисунке 7.

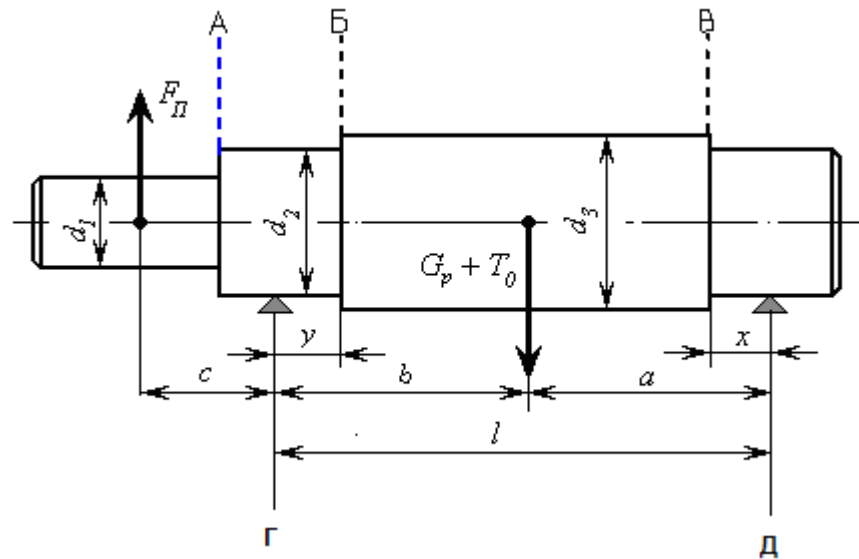


Рисунок 7. Конструкция и основные размеры вала для механического расчёта

$$a = 218 \text{ мм} \quad b = 218 \text{ мм}, \quad c = 100 \text{ мм}, \quad x = 30, \quad y = 30 \text{ мм}, \quad l = 434 \text{ мм},$$

$$d_1 = 65 \text{ мм}, \quad d_2 = 70 \text{ мм}, \quad d_3 = 82 \text{ мм}$$

5.1 Рассчитаем вал на жёсткость. Для этого определим массу ротора [1,стр.244]:

$$M = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0.229^2 \cdot 0.186 = 63,553 \text{ кг},$$

Определим момент инерции участка вала [1,стр.246]:

$$J = \pi \cdot d_2^4 / 64 = 3.14 \cdot 70^4 / 64 = 1,179 \cdot 10^{-6} \text{ м}^4,$$

Тогда приближённое значение силы тяжести:

$$G_p = 9.81 \cdot M_p = 9.81 \cdot 63,553 = 623,451 \text{ Н},$$

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

Для асинхронного двигателя с $h = 200 \text{ мм}$ с достаточным приближением можно принять коэффициенты [1,стр.246]:

$$S_b = (x^3 - x^3) J = (18^3 - 30^3) \cdot 1,179 \cdot 10^{-6} = 8,798 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$$

$$S_a = (y^3 - y^3) J = (18^3 - 30^3) \cdot 1,179 \cdot 10^{-6} = 8,798 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$$

$$S_0 = (x^2 - x^2) J = (18^2 - 30^2) \cdot 1,179 \cdot 10^{-6} = 4,059 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$$

Прогиб вала под действием силы тяжести [с 1,стр.245]:

$$f_G = \frac{G_p}{3 \cdot l^2 \cdot E} \cdot (x^2 \cdot S_b + b^2 \cdot S_a) = \frac{623,451}{3 \cdot 434^2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11}} \cdot (18^2 \cdot 8,798 \cdot 10^3 + 218^2 \cdot 8,798 \cdot 10^3) = 4,479 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

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

5.3 Определим номинальный вращающий момент [1,стр.246]:

$$M_{ном} = 9550 \cdot \frac{P_{ном}}{n_{ном}} = 9550 \cdot \frac{40 \cdot 10^3}{1471} = 233,639 \text{ Н} \cdot \text{м},$$

Реакция передачи равна [1,стр.246]:

$$F_{II} = \frac{k_n}{r} \cdot M_{ном} = \frac{2 \cdot 0,3}{0,65} \cdot 233,639 = 215,667 \text{ Н},$$

где $k_n = 0,3$ коэффициент при передаче упругой кулачковой муфтой [1,стр.246].

Прогиб вала посредине сердечника ротора от реакции передачи составит [1,стр.246]:

$$f_{II} = \frac{F_{II} \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot (1,5 \cdot l \cdot S_0 - S_b) \cdot a + b \cdot S_a,$$

$$f_{II} = \frac{215,667 \cdot 0,1}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 434} \cdot ((1,5 \cdot 434 \cdot 4,059 \cdot 10^4 - 8,798 \cdot 10^3) \cdot 218 +$$

$$218 \cdot 8,798 \cdot 10^3) = 1,067 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

5.4 Начальный эксцентриситет ротора составит [1,стр.247]:

$$e_0 = 0.1 \cdot \delta + f_G + f_{II} = 0.1 \cdot 0.0008 + 4.479 \cdot 10^{-6} + 1.067 \cdot 10^{-6} = 8.555 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения [1,стр.247]:

$$T_0 = 2.94 \cdot D_2 \cdot l_\delta \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = 2.94 \cdot 0.229 \cdot 0.186 \cdot \frac{8.555 \cdot 10^{-5}}{0.0008} = 1.341 \cdot 10^3 \text{ Н},$$

Прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения [1,стр.247]:

$$f_T = f_G \cdot \frac{T_0}{G_p} = 4.479 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{1.341 \cdot 10^3}{623.451} = 9.637 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

5.5 Установившийся прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения [1,стр.248]:

$$f_M = \frac{f_T}{1 - f_T/e_0} = \frac{9.637 \cdot 10^{-6}}{1 - 9.637 \cdot 10^{-6}/8.555 \cdot 10^{-5}} = 1.086 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

5.6 Результирующий прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения, реакции передачи и магнитного притяжения [1,стр.247]:

$$f = f_M + f_G + f_{II} = 1.086 \cdot 10^{-5} + 4.479 \cdot 10^{-6} + 1.067 \cdot 10^{-6} = 1.641 \cdot 10^{-5} \text{ м},$$

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

$$x = \frac{f}{\delta} \cdot 100\% = \frac{1.641 \cdot 10^{-5}}{0.0008} \cdot 100\% = 2.05\%$$

5.7 Определение критической частоты вращения вала.

Первая критическая частота вращения вала с учётом влияния магнитного притяжения [1,стр.248]:

$$n_{кр} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - f_T/e_0}{f_G}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - 9.637 \cdot 10^{-6} / 8.555 \cdot 10^{-5}}{4.479 \cdot 10^{-6}}} = 1,355 \cdot 10^4 \text{ об /мин},$$

Полученное значение должно удовлетворять неравенству: $n_{кр} > 1.3 \cdot n$;

Проверим это условие $13550 > 1471$, Условие выполняется.

5.8 Рассчитаем вал на прочность в наиболее напряженном сечении.

$$Z_1 = 70 \text{ мм}; \quad d_1 = 65 \text{ мм};$$

Изгибающий момент в сечении вала :

$$M_u = k \cdot F_{II} \cdot Z_1 = 2 \cdot 215.667 \cdot 0.07 = 30,193 \text{ Н / м}, \text{ где } k - \text{коэффициент перегрузки};$$

Момент сопротивления при изгибе [1,стр.249]:

$$W = 0.1 \cdot d_1^3 = 0.1 \cdot 0.065^3 = 2,746 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3,$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{np} = \frac{1}{W} \sqrt{M_u^2 + (kaM_{ном})^2} \quad \sigma_{np} = \frac{1}{2.746 \cdot 10^{-6}} \sqrt{30.193^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 233.639)^2} = 1,027 \cdot 10^7 \text{ Па};$$

5.9 Рассчитаем вал на прочность в наиболее напряженном сечении «А».

$$Z_1 = 100 \text{ мм}; \quad d_1 = 70 \text{ мм};$$

Изгибающий момент в сечении вала «А» :

$$M_u = k \cdot F_{II} \cdot Z_1 = 2 \cdot 215.667 \cdot 0.1 = 43.133 \text{ Н / м},$$

Момент сопротивления при изгибе [1,стр.249]:

$$W = 0.1 \cdot d_2^3 = 0.1 \cdot 0.07^3 = 3.43 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3,$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{np} = \frac{1}{W} \sqrt{M_u^2 + (kaM_{ном})^2} \quad \sigma_{np} = \frac{1}{3.43 \cdot 10^{-5}} \sqrt{43.133^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 233.639)^2} = 8,27 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

5.10 Нагрузка от установившегося магнитного напряжения.

$$T = \frac{T_o}{(1-m)}; \text{ где } m=0.113;$$

$$T = \frac{1.341 \cdot 10^3}{(1-0.113)} = 1.512 \cdot 10^3 \text{ Н};$$

Изгибающий момент в сечении вала «Б»:

$y_1 = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad d_2 = 70 \text{ мм}; \quad a = 0.6$ - отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному напряжению при кручении, для нереверсивных машин.

$$M_u = kF_n c \left(1 - \frac{y_1}{l}\right) + G_p + T \frac{a \cdot y_1}{l} =$$

$$2 \cdot 215.667 \cdot 0.1 \left(1 - \frac{30 \cdot 10^{-3}}{434}\right) + 623.451 + 1.512 \cdot 10^3 \frac{0.6 \cdot 30 \cdot 10^{-3}}{434} = 72.326 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Момент сопротивления при изгибе;

$$W = 0.1 \cdot d_2^3 = 0.1 \cdot 0.07^3 = 3.43 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{np} = \frac{1}{W} \sqrt{M_u^2 + (kaM_{ном})^2} = \frac{1}{3.43 \cdot 10^{-5}} \sqrt{72.326^2 + (2 \cdot 0.6 \cdot 233.639)^2} = 8.442 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

Изгибающий момент в сечении вала «В»:

$$x_1 = 30 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad d_3 = 82 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$M_u = \left[F_n c + (G_p + T)b\right] \frac{x_1}{l} = \left[215.667 \cdot 0.1 + (623.451 + 1.512 \cdot 10^3) \cdot 0.218\right] \frac{30 \cdot 10^{-3}}{434} =$$

$$35.156 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Момент сопротивления при изгибе;

$$W = 0.1 \cdot d_3^3 = 0.1 \cdot 0.082^3 = 5.514 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3;$$

Напряжение изгиба:

$$\sigma_{np} = \frac{1}{W} \sqrt{M_u^2 + (kaM_{ном})^2} = \frac{1}{5,514 \cdot 10^{-5}} \sqrt{35,156^2 + (2 \cdot 0,6 \cdot 233,639)^2} = 5,125 \cdot 10^6 \text{ Па};$$

Сопоставляя полученные данные видим, что наиболее нагруженным сечением является сечение с А, для которого

$$\sigma_{np} = 1,027 \cdot 10^7 < 0,7 \cdot 3600 \cdot 10^5$$

Таким образом, вал удовлетворяет всем требованиям механических расчетов.

Выбор подшипников:

Данные для расчета

$G_p = 623,451 \text{ Н}$, $T_o = 1,341 \cdot 10^3 \text{ Н}$, $F_n = 215,667 \text{ Н}$, $C = 0,1 \text{ м}$, $l = 0,434 \text{ м}$,
 $a = 0,218 \text{ м}$, $b = 0,218 \text{ м}$.

При определении радиальных нагрузок на подшипники исходим из наихудшего случая.

Радиальные нагрузки на подшипник для опоры «Г»:

$$R_a = F_H \cdot \frac{c}{l} + G_p + T_o \cdot \frac{b}{l} = 215,667 \frac{0,1}{0,434} + (623,451 + 1,341 \cdot 10^3) \frac{0,218}{0,434} = 1,037 \cdot 10^3 \text{ Н}.$$

Коэффициент, учитывающий характер нагрузки:

$$k_H = 1,5 \text{ (при нагрузке с умеренными толчками).}$$

Приведенная динамическая нагрузка

$$Q_a = k_H \cdot R_a = 1,5 \cdot 1,037 \cdot 10^3 = 1,555 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

Срок службы подшипников:

$$L_d = 18000 \text{ ч.}$$

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника

$$C_a = \frac{Q_a}{25.6} \sqrt[3]{L_d \cdot n} = \frac{1.555 \cdot 10^3}{25.6} \sqrt[3]{18000 \cdot 1500} = 1,822 \cdot 10^4 \text{ Н}$$

при диаметре подшипника 70 мм выбираем подшипник средней серии 314, с $C = 80200 \text{ Н}$.

Радиальные нагрузки на подшипник для опоры «Д»:

$$R_B = F_n \frac{l + C}{l} + G_p + T_o \frac{a}{l} = 215.667 \frac{0.434 + 0.1}{0.434} + (623.451 + 1.341) \frac{0.218}{0.434} = 1.252 \cdot 10^3$$

Н,

Приведенная динамическая нагрузка

$$Q_B = k_H \cdot R_B = 1,5 \cdot 1,252 \cdot 10^3 = 1,878 \cdot 10^3 \text{ Н,}$$

Динамическая грузоподъемность шарикоподшипника

$$C_B = \frac{Q_B}{25.6} \sqrt[3]{L_d \cdot n} = \frac{1,878 \cdot 10^3}{25,6} \sqrt[3]{18000 \cdot 1500} = 2,28 \cdot 10^4 \text{ Н,}$$

При диаметре вала 70 мм выбираем подшипник средней серии 314, с $C = 80200 \text{ Н}$.

Вывод: выбранные подшипники в ходе расчета удовлетворяют требованиям задания.

6. Специальная часть частотно-регулируемый пуск двигателя

Способы регулирования частоты вращения

Существует два принципиально возможных метода регулирования частоты вращения асинхронного двигателя: изменением частоты вращения n_1 магнитного поля или величины скольжения s . Изменение частоты вращения поля n_1 осуществляют двумя способами: Изменением частоты f_1 тока, подаваемого на обмотку статора, или изменением числа полюсов машины $2p$. Изменение скольжения s при заданном нагрузочном моменте $M=M_n$, можно осуществить путём изменения питающего напряжения U_1 , введения в цепь ротора добавочного активного сопротивления (в двигателях с фазным ротором) или подключения обмотки ротора к добавочному источнику дополнительной энергии с изменяющейся частотой f_2 . (в двигателях двойного питания или в асинхронных каскадах).

Частотный способ регулирования частоты вращения позволяет применять наиболее надежные и дешевые асинхронные двигатели с короткозамкнутой обмоткой.

$$M_{\max} = \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega (x_1 + x_2)}$$

или

$$M_{\max} = \frac{k_1 \cdot U_1^2}{f_1^2}$$

где k_1 - постоянный коэффициент.

Отношения моментов при двух значениях частоты будет равно:

$$\frac{M_{\max(1)}}{M_{\max(2)}} = \left[\frac{U_{1(1)} \cdot f_{1(2)}}{U_{1(2)} \cdot f_{1(1)}} \right]^2,$$

где индексы (1) и (2) относятся к различным угловым скоростям.

Отсюда получим закон изменения U_1 при регулировании частоты f_1 :

$$\frac{U_{1(2)}}{U_{1(1)}} = \frac{f_{1(2)}}{f_{1(1)}} \cdot \sqrt{\frac{M_{\max(2)}}{M_{\max(1)}}}$$

Закон изменения напряжения при этом зависит от характера момента нагрузки. В рассматриваемом случае требуется, чтобы момент на валу двигателя при любом значении частоты f_1 оставался неизменным, из предыдущего выражения получим:

$$U_{1(2)} / U_{1(1)} = f_{1(2)} / f_{1(1)} = \text{const}$$

$$U_{1(1)} / f_{1(1)} = U_{1(2)} / f_{1(2)} = \text{const}$$

$$n_0 = n_1 \cdot (1 - s_0)$$

$$n_1 = 60 \cdot \frac{f_1}{p}$$

$$U_1 = 220$$

$$s_{крт} = \frac{r'^2}{\frac{x_{1нас}}{c_{1п.нас}} + x'_{2нас}}$$

$$s_{крт} = 0,3$$

Таблица 6.1 – Расчетное значение частоты

S_0	1	0,8	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	$1 \cdot 10^{-4}$
$M_{н.0}$	1.967	2.245	2.257	2.764	2.893	2.952	2.774	2.01	0.003

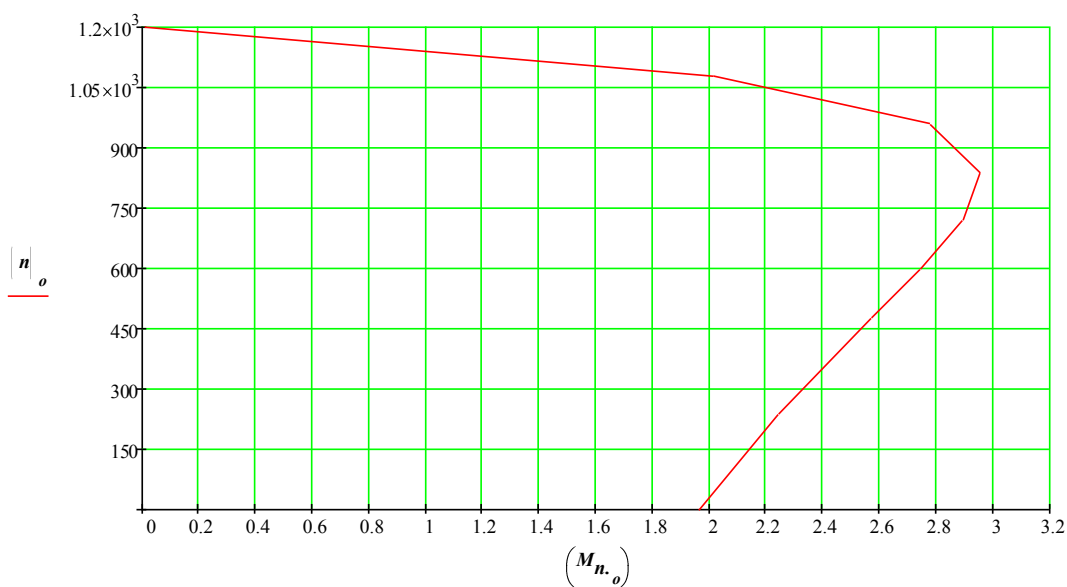


Рисунок 8. Расчетная механическая характеристика для частоты $f_1=40$ Гц.

Результаты расчетов для остальных значений частоты представлены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты расчетов для остальных значений частоты

	f=40 Гц		f=30 Гц		f=20 Гц		f=10 Гц		f=5 Гц	
S, о.е.	n, об/мин	M, о.е.	n, об/мин	M, о.е.	n, об/мин	M, о.е.	n, об/мин	M, о.е.	n, об/мин	M, о.е.
1	0	1,994	0	2,262	0	2,537	0	2,596	0	1,125
0,8	240	2,275	180	2,517	120	2,746	60	2,712	30	1,118
0,6	480	2,61	360	2,786	240	2,93	120	2,817	60	1,116

0,5	600	2,784	450	2,902	300	2,962	150	2,816	75	1,098
0,4	720	2,933	540	2,97	360	2,962	180	2,75	90	1,052
0,3	840	2,963	630	2,926	420	2,839	210	2,571	105	1,029
0,2	960	2,812	720	2,637	480	2,475	240	2,191	120	0,913
0,1	1080	2,038	810	1,832	540	1,665	270	1,444	135	0,598
0,0001	1200	0,003	900	0,003	600	0,002	300	0,002	150	0,0008

По полученным для указанных значений частоты и напряжения точкам построена механическая характеристика, представленная на рисунке 10.

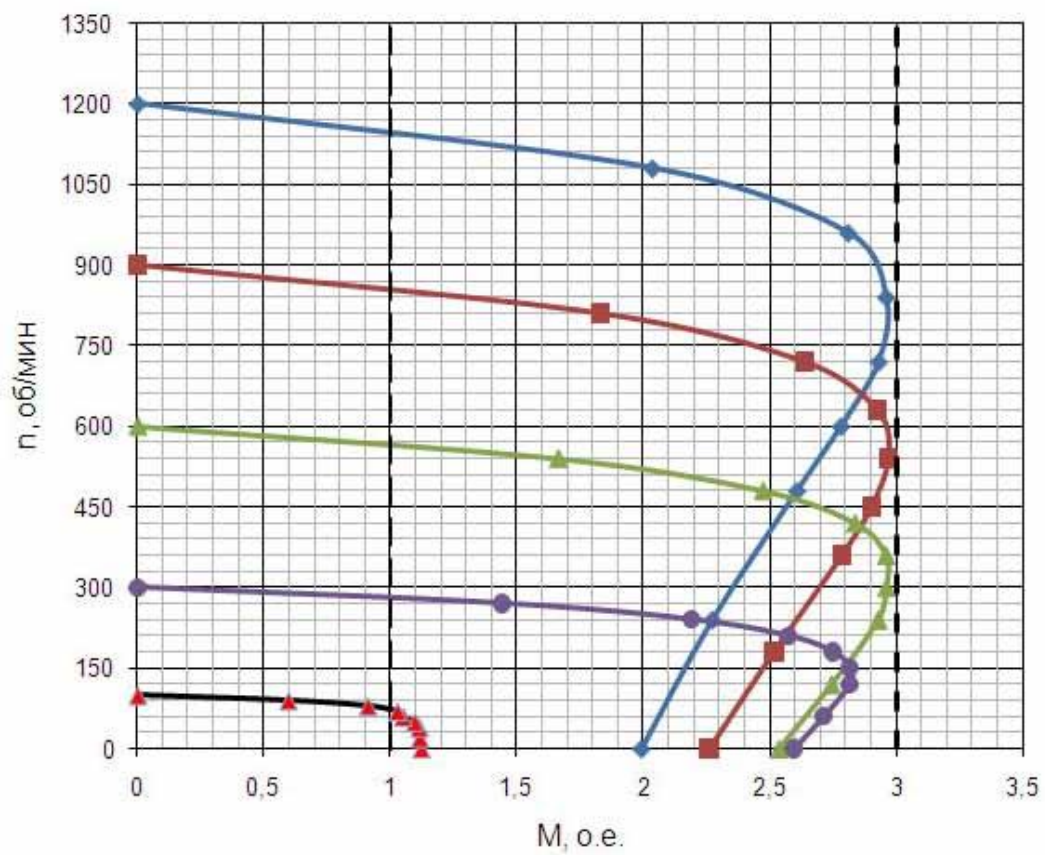


Рисунок 9. Механические характеристики асинхронного двигателя при различных значениях f_1 и $M = \text{const}$

Тем не менее, несмотря на снижение момента, двигатель остается работоспособным при всех рассмотренных значениях частоты, так как пусковой момент двигателя превышает номинальный.

7. Технологический процесс общей сборки асинхронного двигателя короткозамкнутым ротором

7.1 Актуальность технологической части

Производство электрических машин в последние годы характеризуется значительным повышением механизации и автоматизации технологических процессов. Основные промышленные серии машин производятся на специализированных предприятиях с широким использованием автоматических установок и линий. Различными проектно-технологическими институтами были разработаны типовые технологические процессы и специальное технологическое оборудование, что позволяет резко сократить время технологической подготовки производства и трудоемкость выпускаемых изделий. Освоен ряд новых материалов, позволяющих механизировать технологические процессы. В настоящее время перед технологами стоят задачи не только улучшения технологии и технологического оборудования, позволяющих совершенствовать конструкцию машин, а также повышение эффективности производства и получения наиболее экономичных изделий. [2]

7.2 Оценка технологичности конструкции

Достоинством данного электродвигателя:

- 1) В конструкции двигателя применяются стандартные детали и изделия, что обеспечивает их взаимозаменяемость с другими высотами оси вращения;
- 2) Простота конструкции самого двигателя и его, сборочных единиц и деталей.

Недостатки:

- 1) В виду большого габарита, большая масса деталей, что приводит к применению подъемно транспортных механизмов в условиях общей сборки.

7.3 Технологичность конструкции изделия

Конструктор, придавая конструкции изделия в процессе ее разработки необходимые свойства, выражающие полезность изделия, придает ей и такие конструктивные свойства, которые определяют уровень затрат ресурсов на создание, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия.

Совокупность свойств изделия, определяющих приспособленность его конструкции к достижению оптимальных затрат ресурсов при производстве и эксплуатации для заданных показателей качества, объема выпуска и условий выполнения работ, представляет собой технологичность конструкции изделия (ТКИ).

ТКИ выражает не функциональные свойства изделия, а его конструктивные особенности. Конструкцию изделия характеризуют в общем случае состав и взаимное расположение его составных частей, схема устройства изделия в целом, форма и расположение поверхностей деталей и соединений, их состояние, размеры, материалы и информационная выразительность. Поэтому для изделия следует применять термин «технологичность конструкции изделия». [4]

Общие технологические требования к конструкции сборочной единицы. На технологичность конструкции сборочной единицы влияют разнообразные факторы, важнейшими из которых являются следующие:

- конструктивно-технологические свойства сборочной единицы и входящих в нее элементов;
- свойства средств технологического оснащения сборочных работ и производственные условия сборки;

Для обеспечения технологичности конструкции сборочной единицы в процессе конструирования изделия анализ выполнены следующие условия:

- полная взаимозаменяемость деталей и узлов сборочной единицы, т. е. конструктивное оформление деталей и узлов, исключающее подгоночные работы в процессе установки;
- обеспечение удобного подхода при использовании монтажно-сборочных инструментов и приспособлений;
- обеспечение возможности применения прогрессивных средств технологического оснащения (сборочных автоматов, роботов, других средств автоматизации и механизации сборочных работ);
- обеспечение применения дифференцированных схем сборки за счет рационального членения изделия на агрегаты, секции, узлы и детали.

Соблюдение этих условий позволяет широко применять средства автоматизации и механизации сборочных работ и прогрессивные способы организации сборки.

Геометрические формы элементов конструкции сборочной единицы должны быть, по возможности, простыми. Сложные геометрические формы усложняют процесс сборки, так как требуют использования специализированного или специального нестандартного технологического оборудования, инструмента и приспособлений для сборочных работ и контроля качества сборки.

Важным фактором повышения технологичности конструкции изделия является преемственность элементов конструкции. Использование во вновь создаваемой конструкции отдельных составных частей ранее созданных изделий, уже освоенных в производстве и проверенных в эксплуатации, существенно снижает трудоемкость изготовления и затраты на подготовку производства, сокращает сроки освоения в производстве и эксплуатации изделия.

Эффективными методами повышения технологичности конструкции сборочной единицы являются типизация и унификация конструктивных компоновок, узлов и деталей в пределах однотипных групп объектов производ-

ства. Унификация и стандартизация элементов сборочных единиц должны ограничивать применение типоразмеров таких конструктивных элементов, как болты, заклепки, штифты, пружины, резьбы, модули зубчатых колес, диаметры отверстий и т. п. [6]

Общее число деталей в сборочной единице должно быть минимальным, так как введение в конструкцию контуров разъемов (стыков) требует дополнительных трудовых и материальных затрат на их реализацию в производстве изделия.

Сборка электрических машин является заключительным технологическим процессом, при котором комплектные узлы и отдельные детали соединяются в готовое изделие. От правильно выбранного технологического процесса и качественного выполнения всех операций зависят энергетические и эксплуатационные показатели электрической машины: КПД, уровень вибрации и шума, надежность и долговечность.

Технологический процесс сборки складывается из ряда операций, заключающихся в соединении сопрягаемых деталей в узлы, а узлов в машину, отвечающую требованиям чертежей и технических условий. [3]

Технологию сборки можно разделить на сборку узлов и общую сборку. Узлом называют часть машины, состоящую из нескольких деталей, которые можно собрать самостоятельно, отдельно от других элементов машины. Детали электрической машины при соединении их в узлы должны сохранять определенное положение в пределах заданной точности. В одних случаях при сборке должен быть выдержан зазор, обеспечивающий взаимное перемещение деталей, в других — необходимый натяг, обеспечивающий прочность их соединения.

В зависимости от вида производства применяют пять основных способов сборки:

- 1) при полной взаимозаменяемости деталей;

- 2) с сортировкой деталей по группам (способ группового подбора);
- 3) с подбором деталей (неполная взаимозаменяемость);
- 4) с применением компенсаторов;
- 5) с индивидуальной пригонкой детали по месту.

7.4 Составление схемы сборки и маршрутной технологии общей сборки.

После изучения сборочных чертежей и точностного анализа конструкции необходимо разбить изделие на сборочные единицы – составные части. Это основная работа при проектировании технологического процесса сборки при выполнении этой работы целесообразно исходить из следующих принципов.

1 .Сборочная единица не должна быть слишком большой по габаритным размерам и массе или состоять из большого количества деталей и сопряжений. В то же время излишнее «дробление» машины на сборочные единицы не рационально, так как это усложняет процесс комплектования при сборке, создает дополнительные трудности в организации сборочных работ.

2.Если в процессе сборки требуется проведение испытаний, обкатка, специальная слесарная пригонка узла машины, то он должен быть выделен в особую сборочную единицу.

3.Сборочная единица при монтаже ее в машине не должна подвергаться какой либо разборке, а если этого избежать нельзя, то соответствующие разборочные работы необходимо предусмотреть в технологии.

4.Большинство деталей машины, исключая её базовые детали (станину, раму и пр.), а также детали креплений резьбовых соединений, должны войти в те или иные сборочные единицы, чтобы сократить количество отдельных деталей, подаваемых на общую сборку.

5.Трудоёмкость сборки должна быть примерно одинакова для большинства сборочных единиц составных частей машины.

Последовательность сборки в основном определяется конструкцией изделия компоновкой деталей и методами достижения требуемой точности и может быть представлена в виде технологической схемы сборки.

Схема сборки, являясь первым этапом разработки технологического процесса, в наглядной форме отражает маршрут сборки изделия и его составных частей. Технологическую схему сборки составляют на основе сборочных чертежей изделия.

Схема сборки позволяет отразить маршрут сборки изделия, выделить составные части изделия, которые можно собрать отдельно (организовать параллельную сборку составных частей); оценить предварительно трудоемкость сборки отдельных составных частей; иногда выявить конструктивные неувязки; выявить и сравнить варианты технологического процесса. На базе схемы сборки разрабатывается маршрутная технология, устанавливающая последовательность и содержание операций.

Основной задачей на данном этапе является составление технологического маршрута, т.е. перечень, указывающих последовательность операций и их выполнение. Технологический маршрут фиксируется на маршрутных картах, форма и содержание которых определена ГОСТ 3.1118-82.

7.5 Выбор сборочного оборудования и оснастки

Содержание операции определяют тип, основные размеры и технологическую характеристику сборочного оборудования, технологической оснастки (приспособлений, рабочего и измерительного инструмента) и подъемно-транспортных средств. При серийном производстве технологическое оборудование и оснастку применяют универсального, переналаживаемого типа. В массовом производстве преимущественно применяют специальные оборудование и оснастку. Тип, основные размеры и грузоподъемность подъемно-транспортных средств определяют по установленной

организационной форме сборки, размерной характеристике изделия и его массе.

К технологическому оборудованию, предназначенному непосредственно для выполнения работ по осуществлению подвижных или неподвижных сопряжений деталей, их регулировке и контролю в процессе узловой и общей сборки обычно относят прессы, оборудование для балансировки, мойки, нагрева, клеймения, заправки смазками, сборочные стенды. Для выполнения пригоночных работ могут быть применены различные виды металлорежущего оборудования.

Приспособления, применяемые при сборке, по степени специализации разделяют на универсальные и специальные; по степени автоматизации - на ручные, механизированные, полуавтоматические и автоматические; по типу привода - на механические, пневматические, гидравлические и пневмогидравлические; по назначению - на установочно-зажимные, для точной и быстрой фиксации сопрягаемых деталей, для предварительного деформирования упругих элементов, для захвата, подъема и перемещения деталей и сборочных единиц. По виду выполняемых работ их разделяют на приспособления для запрессовки, клепки, развальцовки, свинчивания, гибки, пайки и др.

Инструменты, применяемые при сборке делят на ручной слесарно-сборочный инструмент и ручные машины для слесарно-пригоночных и сборочных работ. К ручному инструменту относят различного назначения и конструкции гаечные ключи, шпильковерты, щипцы, кусачки, плоско- и круглогубцы, слесарные молотки, напильники, керны, зубила. Основным средством механизации слесарно-пригоночных работ являются ручные машины, повышающие производительность труда в 3-10 раз по сравнению с ручным инструментом. Ручные машины (механизированный инструмент) - группа технологических машин со встроенными двигателями, масса которых (обычно 1,5-10 кг) полностью или частично воспринимается руками оператора,

управляющего машиной. Для приведения в движение рабочего органа в ручных машинах используют пневматические, электрические и реже гидравлические приводы. По назначению различают ручные машины общего применения (сверлильные, шлифовальные и полировальные, фрезерные), для слесарно-доводочных работ (развальцовочные, развертывающие, зенковальные, опиловочные, ножницы, кромкорезы, шаберы, пилы по металлу, зачистные и рубильные молотки), для сборочных работ (резьбозавертывающие, резьбонарезные, клепальные молотки, скобозабивные).

7.6 Выбор оборудования

Для сборки узлов изделия в целом применяют верстак ВСМ-15-03-Ц.

Для испытания двигателя на механическую прочность и работу в режимах холостого хода и короткого замыкания используют испытательный стенд Стенд линейный 20 кН.

Для проверки электрической прочности применяется высоковольтная установка 1500×1500 мм Тип установки – ВВУ5.

Для нагрева подшипников применяют индукционную установку.

Для продувки статоров применяют автомат для продувки ПГ5.

Таль электрическая ТЭ100-511

Технические характеристики

Таблица 7.1 – Технические характеристики

Управление подъемом и перемещением	кнопочное с пола
Питание силовой цепи	380В, 50Гц
Питание цепи управления	42В, 50Гц
Способ токоподвода	гибкий кабель
Тип и профиль пути	двутапировые балки 24М, 30М, 36М, 45М

Температурный режим	от -20° до +40°С
---------------------	------------------

Электрические тали (тельферы) являются одними из наиболее распространенных грузоподъемных механизмов. Применяются в качестве механизма подъема на легких грузоподъемных кранах (мостовых однобалочных подвесных и опорных, консольных, козловых, штабелеров) и самостоятельно.

Тали предназначены для подъема, опускания и горизонтального перемещения (по прямым и радиусным участкам пути) грузов массой до 10 тонн, подвешенных на крюк.

Могут работать при температуре окружающей среды от -20°С до +40°С. Электрические тали поставляются в собранном виде, укомплектованными и готовыми для эксплуатации после монтажа, подключения питания и технического освидетельствования.

Индукционный нагреватель для подшипников по принципу действия можно сравнить с электрическим трансформатором, имеющим первичную обмотку с большим числом витков и вторичную короткозамкнутую обмотку, в роли которой выступает подшипник или нагреваемая металлическая деталь с отверстием, через которое проходит магнитопровод трансформатора. Переменный ток большой силы, протекающий во вторичной обмотке - в кольцах подшипника - вызывает их равномерный нагрев до требуемой температуры. Первичная обмотка и магнитопровод трансформатора при этом не нагреваются.

Индукционный нагреватель для подшипников характеризуется следующим:

- оперативно регулируемый нагревательный процесс;
- безопасность для нагревателя; нагревается только рабочая часть прибора;
- отсутствие необходимости использования (технических масел) горячих

- масляных ванн, нет риска локального перегрева детали;
- применимость для герметизированных подшипников и подшипников с защитной шайбой;
- применимость для предварительно смазанных подшипников;
- применимость для подшипников с полиамидной обоймой.

Таблица 7.2 – Характеристики индукционного нагревателя

Напряжение питания	220 В
Мощность	2 кВт
Внутренний диаметр подшипника min	>15 мм
Внешний диаметр подшипника max	600 мм
Макс. высота подшипника	500 мм
Макс. вес подшипника	55 кг
Габаритные размеры	320/225/275 Ш/В/Дмм
Масса	14 кг
Авторазмагничивание	Есть

7.7 Выбор инструмента.

Для повышения производительности применяют механизированный инструмент.

Для наворачивания гаек используют электрогайковёрт ИЭ 3113 наибольший диаметр резьбы 15мм, момент затяжки 125н*м, масса 3,8кг, габаритные размеры 363×70×243 мм от сети 220 В.

Для заворачивания винтов используют электровинтовёрт ИЭ 3606, наибольший диаметр резьбы 6мм, момент затяжки 15н*м, , габаритные размеры 320×70×130 мм от сети 220 В.

1 мегаомметр, 2 вольтметра, 2 амперметра.

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

1 ваттметр, 1 тахометр.

Ротор и статор собирают отдельно друг от друга и затем они поступают на участок общей сборки.

7.8 Выбор подъемно-транспортных средств

Для транспортировки деталей, сборочных единиц и готовых изделий применяется механизированную линию.

Для хранения используется ящик 300×200мм, для подъёма, перемещения, опускания используется кран балка.

7.9 Нормирование сборочных работ и расчет количества технологического оборудования для обеспечения заданной программы

Технически обоснованной нормой времени называют регламентированное время выполнения технологической операции в

определенных организационно-технических условиях, наиболее благоприятных для данного производства.

Штучным временем называют отношение времени выполнения технологической операции к числу изделий одновременно собираемых на одном рабочем месте. [5]

При расчетно-аналитическом методе технически обоснованную норму времени устанавливают на каждую сборочную операцию.

Штучное время равно

$$T_{шт} = T_o + T_v + T_{об} + T_{п},$$

где T_o основное(технологическое) время ;

T_v - вспомогательное время;

$T_{об}$ - время организационного обслуживания рабочего места;

$$T_{об} = 0,05 T_{оп}$$

$T_{п}$ - время перерывов для удовлетворения естественных надобностей и отдыха рабочего.

$$T_{п} = 0,03 T_{оп}$$

Так как элементы основного и вспомогательного времени тесно связаны между собой, при сборке нормируют и оперативное время.

$$T_{оп} = T_o + T_v .$$

Основное время учитывает изменение состояния продукта производства в процессе сборки. Оно затрачивается на выполнение соединений, регулирование, пригонку сопрягаемых деталей, подбор и размерную сортировку деталей, подготовку деталей к сборке.

При слесарных работах и сборке основное время нормируют по соответствующим нормативам.

Вспомогательное время учитывает действия, которые сопровождают и обеспечивают выполнение основной работы. Оно включает время на установку, закрепление и снятие собираемой части изделия, управление механизмом и оборудованием, а также на контроль выдерживаемых при сборке размеров. Вспомогательное время находят суммированием элементов времени на выполнение перечисленных действий по всем переходам операции, устанавливаемых по нормативам вспомогательного времени. Как и основное, вспомогательное время может быть ручным, машинно-ручным и машинным.

Время организационного обслуживания рабочего места учитывает затраты времени на подготовку рабочего места к началу работы, замены инструмента в процессе работы, уборку рабочего места в конце смены, смазку и чистку сборочного оборудования и приспособлений и т.п.. Его определяют в процентах от оперативного времени по нормативам (обычно в пределах 0,6-8%).

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

При сборке изделий партиями вместо штучного времени Тшт определяют штучно-калькуляционное Тшт.к.

$$Тшт.к = Тшт + Тпз/п$$

где Тпз - подготовительно заключительное время, п - число изделий в партии.

Подготовительно заключительным называют время, которое затрагивает сборщик на ознакомление с чертежом изделия, подготовку и наладку оборудования, приспособлении и инструментов, снятие и сдачу инструментов и

приспособлений после выполненной работы и сдачу собранных изделий. Тпз определяют по нормативам.

$$T_{пз}=0,02T_{оп} \quad (2\% \text{ от операц. времени})$$

$$n=N*k/12\text{мес}=13\,500*1,03/12=1158$$

$N=13\,500$ шт/год-годовая программа выпуска.

$K=1,03$ -коэффициент учитывающий брак.

Результаты в таблицу.

Таблица 7.3 – Нормирования сборочных работ

Переход	№ опер	То	Тв	Топ	Тоб	Тп	Тшт	Тпз	Тшт.к
Собрать двигатель в сборе Верстак	15	31,0	0,106	31,412	0,321	0,192	31,84	0,128	31,84
Контрольная	20	10,58	0,016	11,05	0,014	0,008	11,28	0,005	11,286
Испытания двигателя Испытательный стенд	25	21,18	0,156	22,01	0,34	0,204	22,1	0,136	22,195

Для определения количества оборудования необходимо знать объем выпуска изделий – 13 500, нормы времени (таблица 7.3), а эффективный годовой фонд времени работы одного станка при 40 – часовой рабочей неделе с двумя выходными можно рассчитать по формуле:

$$F_d = ((365 - 104 - 12) * 8) - 6) * 1 * 0.96 = 1907 \text{ часов, где}$$

$V_d=104$ – Количество выходных дней в году;

$P_d=12$ – количество праздничных дней в году;

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

$K_p=0,98$

количество смен работы оборудования, $Z=1$.

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

$N=13\,500$ – годовая программа выпуска изделий.

Расчётное число каждого из видов сборочного оборудования равно:

$$C_p = (T_{штк} * N) / (60 * F_g) ;$$

Автомат для продувки

$$C_{рв} = (0,227 * 13\,500) / (60 * 3814) = 0,021 \text{ ,принимаем: } C_{прв}=1;$$

Установка индукционного нагрева

$$C_{рв} = (0,34 * 13\,500) / (60 * 3814) = 0,031 \text{ ,принимаем: } C_{прв}=1;$$

- Для верстака

$$C_{рв} = (31,84 * 13\,500) / (60 * 1907) = 1,67 \text{ ,принимаем: } C_{прв}=2;$$

- Для пресса

$$C_{рв} = (6,925 * 13\,500) / (60 * 1907) = 1,33 \text{ ,принимаем: } C_{прв}=2;$$

- Для испытательного стенда

$$C_{рп} = (22,195 * 13\,500) / (60 * 1907) = 1,16 \text{ ,принимаем: } C_{прп}=2;$$

- Для верстака

$$C_{рс} = (11,286 * 13\,500) / (60 * 1907) = 0,592 \text{ ,принимаем: } C_{прс}=1;$$

Таким образом коэффициент загрузки

$$K_z = (C_p / C_{пр}) * 100$$

Автомат для продувки

$$K_{3B} = (0,021 / 1) * 100 = 2,1 \%$$

Установка индукционного нагрева

$$K_{3B} = (0,031 / 1) * 100 = 3,1 \%$$

- Для верстака

$$K_{3B} = (1,67 / 2) * 100 = 83,5 \%$$

- Для пресса

$$K_{3B} = (1,33 / 2) * 100 = 66,5 \%$$

- Для испытательного стенда

$$K_{3B} = (1,16 / 2) * 100 = 58,2 \%$$

- Для верстака

$$K_{3B} = (0,592 / 1) * 100 = 59,2 \%$$

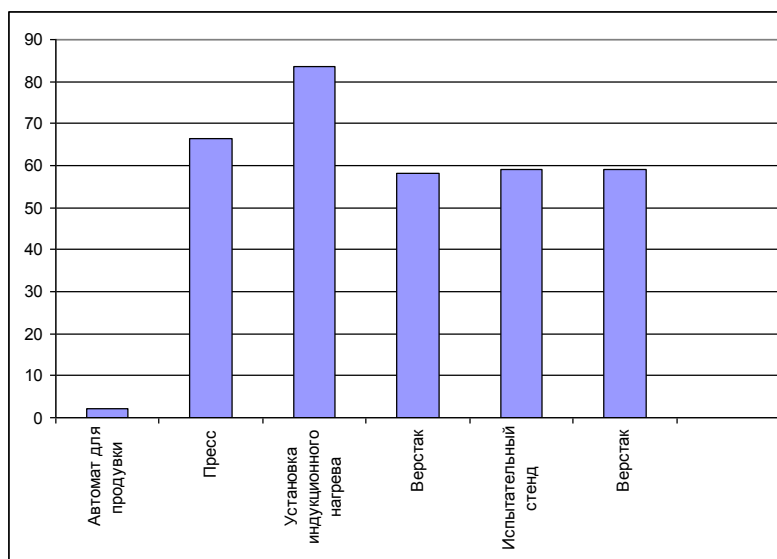


Рисунок 10. График загрузки оборудования

8. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В данной части выпускной квалификационной работы освещены вопросы технико-экономического обоснования производства асинхронного двигателя на ООО «НПО Сибэлектромотор».

Для этого обоснования необходимо решить задач:

- оценка коммерческого потенциала инженерных решений;
- оценка целесообразности производства двигателя;
- оценки ресурсной эффективности продукции.

Представитель отрасли электромеханической промышленности в г.Томске ООО «НПО Сибэлектромотор» является одним из крупнейших поставщиков электрических двигателей в стране. Предприятие обладает высоким техническим потенциалом, имеет достаточно современное оборудование и квалифицированных специалистов. В настоящее время является стабильным производителем асинхронных двигателей.

8.1 Оценка коммерческого потенциала проектируемого двигателя

Оценка коммерческого потенциала может быть проведена при помощи конкурентоспособности и проекта анализ рынка продукта.

8.1.1 Анализ потенциальных рисков и разработка мер по управлению ими

На данный момент единой классификации проектных рисков предприятия не существует. Однако можно выделить следующие основные виды рисков, присущие практически всем проектам [7]:

- маркетинговый риск,
- риск ликвидности,
- рыночный риск,

- риск несоблюдения графика проекта,
- риск превышения бюджета проекта,
- общеэкономические риски.

Оценке в работе представлены анализом потенциальных рисков и анализом мер по управлению ими.

Маркетинговый риск — это риск недополучения прибыли из-за снижения объема реализации или цены товара. Ошибки в планировании дохода происходят из-за недостаточного анализа рынка: неверной оценки конкурентоспособности или неправильного ценообразования. Также на маркетинговый риск влияют ошибки в стратегии продвижения: недостаточный бюджет на продвижение или неправильный способ продвижения.

Риск ликвидности – вероятность получения убытка из-за недостатка денежных средств и неспособности выполнить свои обязательства. Последствия риска ликвидности: штрафы, пени, ущерб деловой репутации, банкротство. Риск возникает по причине непрофессионального управления оборотным капиталом.

Рыночный риск – влияние внешних по отношению к предприятию факторов, возникающих в результате изменения конъюнктуры рынка: колебания цен, курсы валют, котировки ценных бумаг. Рыночным рискам в наибольшей степени подвержены самые ликвидные активы компании: денежные средства, ценные бумаги, товарные запасы.

Риски несоблюдения графика и превышения бюджета проекта. Причины возникновения таких рисков могут быть объективными (например, изменение таможенного законодательства в момент растормаживания оборудования и, как следствие, задержка груза) и субъективными (например, недостаточная проработка и несогласованность работ по реализации проекта). Риск несоблюдения графика проекта приводит к увеличению срока его окупаемости как напрямую, так и за счет недополученной выручки. В нашем случае этот

риск будет велик: если компания не успеет начать реализацию новой продукции до конца зимнего пика продаж, то понесет большие убытки.

К общеэкономическим относят риски, связанные с внешними по отношению к предприятию факторами, например, риски изменения курсов валют и процентных ставок, усиления или ослабления инфляции. К таким рискам можно также отнести риск увеличения конкуренции в отрасли из-за общего развития экономики в стране и риск выхода на рынок новых игроков. Оценка рисков производится в процессе планирования проекта и включает качественный и количественный анализ. Если по итогам оценки проект принимается к исполнению, то перед предприятием встает задача управления выявленными рисками. По результатам реализации проекта накапливается статистика, которая позволяет в дальнейшем более точно определять риски и работать с ними. Если же неопределенность проекта чересчур высока, то он может быть отправлен на доработку, после чего снова производится оценка рисков.

Таблица 8.1 - Риски и меры по ограничению их последствий [7]

Виды рисков	Меры по ограничению последствий рисков
• Неустойчивость спроса • Риск, обусловленный поведением конкурентов • Появление альтернативного продукта • Рост налогов • Снижение платежеспособности потребителей • Непредвиденные обстоятельства (аварии, катаклизм) • Рост цен на ресурсы • Небрежность и недобросовестность работников • Перевозка грузов (некомплектная поставка) • Нарушение технологии или освоение новой технологии	• Страхование имущества и транспортных перевозок • Изучение изменений в российском законодательстве • Расширение состава поставщиков • Создание резерва для покрытия непредвиденных расходов • Систематическое изучение конъюнктуры рынка • Обучение персонала работе на новом технологическом оборудовании • Определение мер воздействия к неисполнительным работникам • Активные маркетинговые действия

8.1.2 Оценка конкурентоспособности проектируемого двигателя

Основными конкурентоспособными производителями двигателей являются не только отечественные производители асинхронных двигателей но есть и другие производители.

Составим таблицу по оценки факторов конкурентоспособности продукции и сведем в таблицу 8.2. [8]

Таблица 8.2 - Оценка факторов конкурентоспособности продукции

Факторы конкурентоспособности продукции	ООО «НПО Сибэлектро мотор» г.Томск	ООО «НПО Сибмаш» г.Томск	ООО НПО «Мотор» г. Уфа	ООО «Элдин» г. Ярослав
<i>1.Продукция (Асинхронный электродвигатель)</i>				
- качество	5	4	5	3
- показатели	5	4	3	4
- престиж марки	5	5	4	4
- упаковка	5	4	4	3
- обслуживание	5	5	5	4
- гарантия	5	5	4	4
- надежность	5	5	4	4
- защищенность	5	5	4	5
<i>2.Цена</i>				
- продажа	4	5	5	5
- сроки платежа	4	4	4	5
<i>3.Каналы сбыта</i>				
- прямая	4	4	3	4
- через посредников	5	4	3	5
- Транспортировки	Авто, ж.д., авиа	Авто, ж.д,	Авто, ж.д, авиа	Авто, ж.д,
<i>4. Реклама</i>				
- для потребителей	4	5	4	4
- для посредников	5	4	4	4
<i>5. Стимулирование</i>				
- показ образцов	5	5	4	4
- маркетинг	4	3	4	4

Примечание: оценка факторы конкурентоспособности продукции производится по пяти бальной шкале. 1 – неэффективный показатель. 5 – эффективный показатель.
--

ООО «НПО Сибэлектромотор» после реализации продукции согласно договору о купле продаже продукции предоставляется сервисное обслуживание, консультации специалистов по возникающим вопросам при монтаже и эксплуатации двигателя.

Из таблицы 8.2 видно, что практически по всем показателям ООО «НПО Сибэлектромотор» является лидером. Что и характеризует ООО «НПО Сибэлектромотор», как один из крупнейших отечественных производителей асинхронных двигателей переменного тока.

По результатам экспериментирования видно, что ООО «НПО Сибэлектромотор» проигрывает по таким показателям, как цена продажи, реклама для потребителей и в маркетинге в целом.

8.2 Расчет себестоимости производства двигателя

Себестоимости проектируемого асинхронного двигателя производим на основе данных, полученных для базового асинхронного двигателя АИР200 выпускаемого на предприятии ООО «НПО Сибэлектромотор», в ценах на первый квартал 2016 года.

Себестоимость проектируемого электродвигателя складывается из следующих основных статей:

- материальные расходы;
- расход на электроэнергию;
- отчисления на социальные нужды;
- расходы на оплату труда;
- накладные расходы.

Установленные ставки и тарифы приняты в расчётах по состоянию на первый квартал 2016 года.

8.2.1 Материальные затраты

Материальные затраты показывают расход материалов, необходимых для изготовления единицы продукции, в данном случае производство одного двигателя. Они определяются по формуле:

$$M = Q \times C_m,$$

где Q - норма расхода материала;

C_m - цена материала.

Затраты на сырье и материалы C_m сведем в таблицу 8.3.

Таблица 8.3 – Затраты на сырье и материалы

Наименование материала	Цена, руб.	Норма расхода, кг/ шт	Сумма, руб.	Структура затрат, %
Черные металлы				28,7
Чугун	61,50	10,90	670,35	
Валовая сталь	58,21	9,40	547,17	
Сталь 2212	95,80	12,97	1242,53	
Цветные металлы				26,8
Медь	298,00	3,56	1060,88	
Латунь Л63	329,00	2,12	697,48	
Алюминий АК7	174,00	3,10	539,40	
Подшипник				14,0
Подшипник	600,00	2,00	1200,00	

Кабельные изделия				17,7
Обмоточный провод	955,00	1,50	1432,50	
Провод установ ПуГВ	250,00	0,35	87,50	
Изоляция				12,8
Ст.пласт ССПБИД	221,00	1,20	265,20	
Стеклолакоткань ЛСП	169,00	0,80	135,20	
Синтофлекс 51	240,00	0,70	168,00	
Пленка ПЭТ-Э	410,00	0,50	205,00	
Трубка ТКР	140,70	0,73	102,71	
Лакокраски	199,00	1,13	224,87	
Всего			8578,79	100,0

По таблице 8.3 видно, что основную часть материальных затрат составляют черные металлы (29%) и цветные металлы (27%) соответственно.

Полная стоимость сырья и материалов включает транспортные расходы на заготовление и приобретение и рассчитывается по формуле:

$$C_m = M \times K_{m.zp},$$

где $K_{m.zp}$ - коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы.

$$K_{m.zp} = 1,14:$$

$$C_m = 8578,79 \times 1,14 = 9,8 \text{ тыс.руб/шт}$$

8.2.2 Расходы на электроэнергию

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\Theta = \frac{\sum N \times t_{um} \times k_3 \times k_{30} \times k_{nc} \times C_3}{\eta}$$

где N - установленная мощность электродвигателей, кВт;

t_{um} – трудоемкость технологической операции;

k_3 – средний коэффициент загрузки электродвигателей по мощности;

$k_3=0,65$

k_{30} – средний коэффициент загрузки электродвигателей во времени;

$k_{30}=0,85$

k_{nc} – коэффициент потери электроэнергии в сети; $k_{nc}=1,05$

C_3 – цена 1кВт часа электроэнергии руб/шт; $C_3=5,5$ руб.

η – средний коэффициент полезного действия двигателей; $\eta =0,88$

Результаты расчёта сводим в таблицу 8.4.

Таблица 8.4 – Расчет расходов на силовую электроэнергию

Станок	Мощность, кВт	Трудоемкость, час/шт	Стоимость электроэнергии, руб/шт
Токарный	15,0	1,70	82,3
Фрезерный	11,0	1,00	31,3
Точильный	4,0	0,20	2,2
Сверлильный	3,0	1,20	10,2
Прессовочный	3,5	1,27	12,6
Штамповочный	10,0	0,36	10,2

Шлифовальный	5,5	0,80	12,5
Всего		6,53	161,6

8.2.3 Полная заработная плата технологических рабочих

Полная заработная плата включает в себя основную и дополнительную заработную плату. Основная заработная плата рабочих определяется на основании трудоёмкости изготовления электрической машины по операциям. Она включает в себя тарифную заработную плату, премиальные, надбавки и выплаты по районному коэффициенту.

В таблице 8.5 рассчитана тарифная заработная плата основных рабочих.

Таблица 8.5 - Тарифная заработная плата

Виды работ	Трудоемкость, час/шт	Тарифная ставка, руб./час	Заработная плата, руб./шт.
Заготовительные	0,40	108,80	44
Токарные	2,66	155,70	414
Фрезерные	1,54	163,80	252
Прессовочные	1,68	143,10	240
Штамповочные	0,52	143,10	74
Точильные	1,69	155,70	263
Сверлильные	1,40	122,40	171
Слесарные	1,30	138,40	180
Намоточно-обмоточные	1,50	127,20	191
Шлифовочные	1,04	122,40	127
Сборочные	0,70	138,40	97
Отделочные	0,80	127,20	102

Проверка (ОТК)	0,60	145,60	87
Итого			2243

$$З_{осн} = З_{т} \times Пр \times Нд,$$

где $З_{осн}$ – основная заработная плата;

$З_{т}$ – тарифная заработная плата;

$Пр$ – коэффициент, учитывающий премиальные выплаты; $Пр = 1,3$

$Нд$ – надбавки; средний процент надбавок составляет 20% от тарифной заработной платы;

Основная заработная плата рассчитывается на основании данных планово-экономического отдела ООО «НПО Сибэлектромотор»

$$C_{осн} = 2,2 \times 1,3 \times 1,2 = 3,5 \text{ тыс. руб./шт.}$$

Дополнительная заработная плата начисляется рабочим и служащим за непроработанное время, предусмотренное действующим законодательством. В том числе оплата компенсаций, обучение учеников, времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей, очередных отпусков, по уходу за ребенком, выходное пособие при увольнении.

Дополнительная заработная плата учитывается так же, как и основная, и включается в фонд заработной платы предприятия. Дополнительная заработная плата составляет 11% от основной заработной платы.

$$C_{доп} = 3,5 \times 0,11 = 0,4 \text{ тыс. руб./шт.}$$

8.2.4 Отчисление во внебюджетные фонды

Отчисления во внебюджетные фонды составляют 30% от суммы основной и дополнительной заработной платы

$$C_{соц} = (C_{осн} + C_{дон}) \times 0,30;$$

$$C_{соц} = (3,5 + 0,4) \times 0,30 = 1,2 \text{ тыс. руб./шт.}$$

8.2.5 Накладные расходы

В расчёте используются данные ООО «НПО Сибэлектромотор», в которых накладные расходы составляют фиксированный процент (350%) от суммы основной заработной платы.

Накладные расходы включают расходы по содержанию и эксплуатации оборудования, управлению предприятием, по реализации продукции и прочие, которые не могут быть непосредственно отнесены на ту или на иную продукцию, изготавливаемую на предприятии.

Накладные расходы рассчитываются по формуле:

$$C_{накл} = C_{осн} \times k_{накл}$$

где $k_{накл}$ – процент накладных расходов

Рассчитаем накладные расходы:

$$C_{накл} = 3,5 \times 3,5 = 12,3 \text{ тыс. руб./шт}$$

Расчёт себестоимости электродвигателя приведён в таблице 8.5.

Таблица 8.6 – Расчёт себестоимости асинхронного двигателя

№	Наименование	Сумма тыс. руб.	Удельный вес, %
1	Расходы на основные материалы	9,8	34
2	Расход на сил.электроэнергию	0,2	1
3	Полная заработная плата	3,9	13
4	Отчисления на социальные нужды	1,2	4

5	Накладные расходы	12,2	42
	Итого производственная себестоимость	27,3	94
6	Расходы на продажу*	1,7	6
	Итого полная себестоимость	29,0	100
	* - Расходы на продажу составляют 7 % от производственной себестоимости		

Себестоимость проектируемого двигателя составляет 29 тыс. руб. Заметим, что 42% составляют накладные расходы.

8.3 Определение рентабельности продукции

Анализа цен продукции основных производителей и поставщиков двигателей этого типа на российском рынке, позволил сделать вывод, что средняя цена в начале 2016 года на подобные двигатели не превышает 45 тыс. руб. Поэтому для обеспечения успешной конкуренции и стабильного спроса, устанавливаем цену на продукцию 45 тыс. руб. (без учета НДС). [9]

Рентабельность продукции показывает отношение прибыли от реализации этой продукции (*Приб*) к ее себестоимости ($C_{полн}$).

Рентабельность выпускаемого двигателя составит:

$$Рент = \frac{Приб}{C_{полн}} \times 100\% = \frac{45 - 29}{29} \times 100 = 55\%$$

8.4 Расчет прибыли, определение критического объема производства

Одним из основных финансовых показателей плана и оценки производственной деятельности организации является прибыль. За счёт прибыли осуществляется финансирование мероприятий по научно-техническому и социально-экономическому развитию.

Прибыль от реализации продукции представляет собой разницу между общей суммой выручки и затратами на производство и реализацию продукции.

Прибыль от реализации составит:

$$Приб = Ц_{рын} - C_{полн} = 45 - 29 = 16 \text{ тыс.руб / шт}$$

Критическая программа - это объем производства, при котором выручка от реализации продукции равна ее полной себестоимости. Критический объем производства определяется по формуле:

$$Q_{кр} = \frac{C_{пост}}{Ц - C_{пер}} \text{ шт / год},$$

где Ц – цена единицы продукции;

$C_{пост}$ – постоянные издержки, т.е. расходы, которые не зависят от объема от производства (в нашем случае принимаются в виде суммы накладных расходов и расходов на продажу).

$C_{пер}$ – переменные издержки, т.е. расходы, которые изменяются пропорционально объему производства (в нашем случае принимаются в виде суммы расходов на основные материалы, силовую электроэнергию, полную заработную плату, отчисления на социальные нужды).

$$Q_{кр} = \frac{C_{пост}}{Ц - C_{пер}} = \frac{187650}{45 - 15,1} = 6276 \text{ шт / год}$$

Диапазон безопасности составит:

$$J_{без} = \frac{Q - Q_{кр}}{Q} \cdot 100 = \frac{13500 - 6276}{13500} \cdot 100 = 53,5 \, \%.$$

Эта величина показывает, как далеко объем производства данной продукции предприятия находится от критической программы выпуска. Считается, что производство продукции не связано с большими рисками при

диапазоне безопасности более 53,5 %. В противном случае при увеличении цен на сырье и материалы или увеличении других издержек предприятие рискует оказаться в зоне убытков, что может привести к его банкротству.

По полученным данным строим график безубыточности.

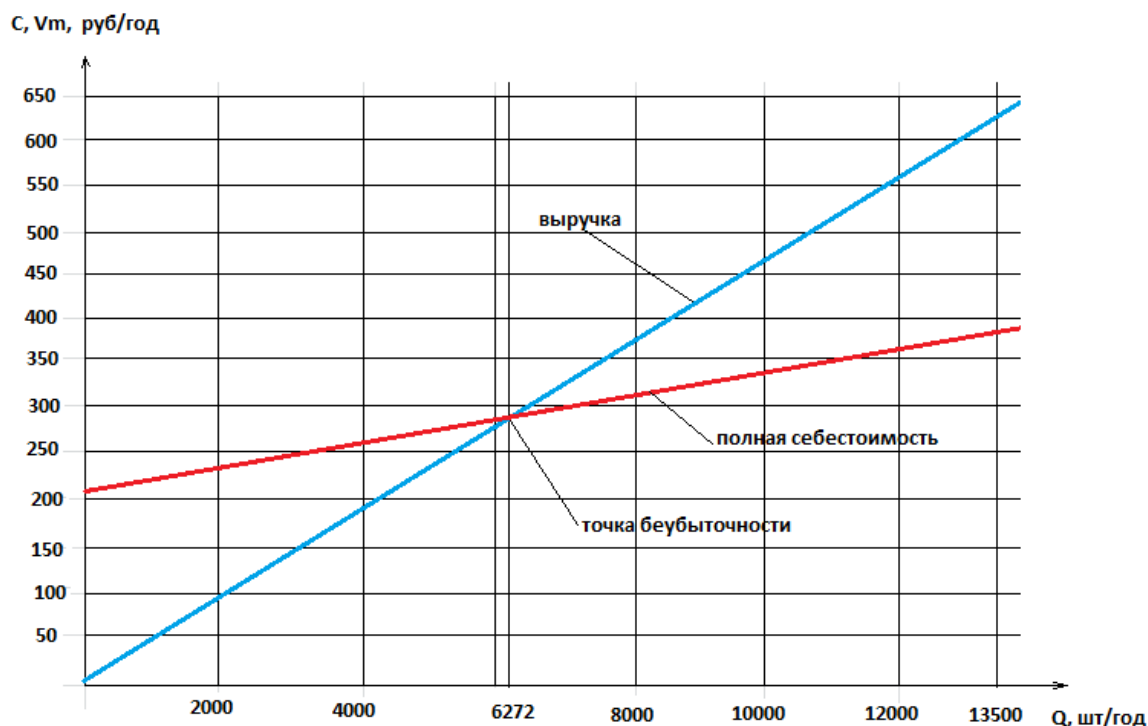


Рисунок 11. График безубыточности проектируемого двигателя
где V_m – выручка от реализации, руб./год; Q – Объем производства, шт./год; C – полная себестоимость, руб./год.

Экономическая часть выпускной квалификационной работы была представлена с целью оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения инженерных решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Рассматривался технологический процесс разработки двигателя.

Производство данного типа двигателя при поддержании уровня продаж на уровне производства в 13500 шт./год можно считать прибыльным. Рентабельность данной продукции составляет 55%.

Анализ позволил сделать вывод, что при проектировании данной продукции серьезных проблем не возникает, в случае чего их можно решить путем повышения цены продукции или же выходить на новые уровни сбыта.

8.5 Расчет экономии электроэнергии при эксплуатации двигателя

Приведем сравнение характеристик проектируемого асинхронного двигателя и базового варианта асинхронного двигателя, произведенного на ООО «НПО Сибэлектромотор».

Характеристики двигателей представлены в таблице 8.7

Таблица 8.7 – Характеристики электродвигателей.

Характеристики	Проектируемый двигатель	Базовый двигатель
Мощность, кВт	42	42
Об/мин	750	750
КПД, %	91,3	90,0
Масса, кг	250	230

Затраты на электроэнергию рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E} = \frac{N \times F_{\partial} \times k_{nc}}{\eta}$$

где $\mathcal{E}$ – расход на электроэнергию;

N - установленная мощность электродвигателей, кВт/час;

F_{δ} – фонд времени работы двигателя в условиях односменной работы, час; $F_{\delta}=2000$ ч/год.

K_{nc} – коэффициент потери электроэнергии в сети; $K_{nc}=1,05$.

η – средний коэффициент полезного действия двигателей.

Рассчитаем затраты на силовую электроэнергию.

Расходы электроэнергии проектируемого двигателя составляет:

$$\mathcal{E} = \frac{42 \times 2000 \times 1,05}{0,91} = 96,9 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{час}$$

Расходы электроэнергии базового двигателя составляет:

$$\mathcal{E} = \frac{42 \times 2000 \times 1,05}{0,90} = 98 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{час}$$

Из расчета видно, что при использовании проектируемого электродвигателя потребитель при режиме односменной работы сэкономит в год силовой электроэнергии 1,1 тыс. кВт/час. Тем самым проектируемый асинхронный двигатель ресурсоэффективнее, чем электродвигатель, произведенный ООО «НПО Сибэлектромотор».

9. Социальная ответственность

9.1 Анализ опасных и вредных факторов

При механической обработке возникает ряд вредных и опасных производственных факторов.

Опасные факторы возникающие при данном технологическом процессе:

- Поражение электрическим током, при работе испытательной станции.
- Получение механических травм, при слесарно-сборочных работах.

Наряду с опасными факторами можно выделить вредные факторы, которые приводят к нарушению нормального режима работы. К вредным факторам относятся:

- Отклонение параметров микроклимата на участке механической обработки станины от установленных норм.
- Шум, при работе с ручным механизированным инструментом (пневмогайковерт).
- Вибрация, при работе с ручным механизированным инструментом (пневмогайковерт).
- Недостаточная освещенность на рабочей поверхности

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 $ПДК = 0.01 \text{ мг/м}^3$, класс опасности – 1; марганец, его $ПДК = 0.1 \text{ мг/м}^3$, класс опасности 2. Также при сборке применяется сварка что влечет за собой образование таких веществ как СО, его $ПДК = 20 \text{ мг/м}^3$, класс опасности 4; Пыль сварочная аэрозоль, её $ПДК = 4 \text{ мг/м}^3$, класс опасности 2. [11]

Контролем содержания вредных примесей в воздухе и на рабочих местах занимается санитарная лаборатория.

С учётом предельно - допустимых концентраций вредных веществ, эти участки выполняются с вытяжной вентиляцией.

9.2 Производственная санитария

В результате гигиенических исследований установлено, что шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывая вредное воздействие на организм человека.

При длительном воздействии шума на организм человека происходят нежелательные явления:

- снижается острота зрения, слуха;
- повышается кровяное давление;
- снижается внимание.

Сильно продолжительный шум может быть причиной функциональных изменений сердечно сосудистой и нервной систем. Измерение шума проводят с целью оценки его на рабочих местах или рабочих зонах для сопоставления с требованиями санитарных норм, а также для оценки шумовых характеристик машин и оборудования, с целью разработки мероприятий по борьбе с шумом. Для оценки шума используют частотный спектр измеренного уровня звукового

давления, выраженного в децибелах в активных полосах частот, который сравнивают с предельным спектром. [12]

9.3 Расчет искусственного освещения

Другой не мало 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 лк СНиП23-05-95. [13]

В данном случае это условие выполняется, так как проектируемый участок разработан на базе действующего, где заводская комиссия в своё время проводила замеры искусственного освещения и заключила что оно соответствует норме.

Разряд зрительной работы IV б размер предметов различения от 0,5 до 1 мм.

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.

9.4 Выбор системы освещения

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.

9.5 Выбор коэффициента запаса

Полученная из [СН 23-05-95] величина освещённости корректируется с учетом коэффициента запаса, так как со временем за счет загрязнения светильников и уменьшения светового потока ламп освещённость снижается.

Таблица 9.1 – Значение коэффициента запаса

Характеристика объекта	Люминесцентные лампы	Лампы накаливания
Помещения с большим выделением пыли	2.0	1.7
Помещения со средним выделением пыли	1.8	1.5
Помещения с малым выделением пыли	1.5	1.3

9.6 Размещение осветительных приборов

При выборе расположения светильников необходимо руководствоваться двумя критериями:

1. обеспечение высокого качества освещения, ограничение ослепленности и необходимой направленности света на рабочие места
2. наиболее экономичное создание нормированной освещенности

Как показали исследования, в зависимости от типа светильников существует наивыгоднейшее расстояние между светильниками: $\lambda = \frac{L}{h}$, где

L - расстояние между светильниками;

h - высота подвеса светильника над рабочей поверхностью

Для люминесцентных светильников с защищённой решёткой (ОДП, ШОД, ОДОП) $\lambda = 1.1-1.3$.

Для светильников с люминесцентными лампами без защищённой решётки (ОД, ОДО) $\lambda = 1.4$

Расстояние от стен помещения до крайних светильников рекомендуется брать $L/3$

Выбираем люминесцентный светильник без защищённой решётки:

тип ОДО, $\lambda = 1.4$. размеры помещения $a=30$ м, $b=15$ м, ширина между рядами светильников $L_{св.} = \lambda * h = 1.4 * 5 = 7$ М

Количество светильников в одном ряду:

По длине:

$$n_{св.дл} = \frac{a - L_{св}}{L_{св}} + 1$$

$$n_{св.дл} = \frac{30 - 7}{7} + 1$$

$$n_{св.дл} = 4$$

По ширине:

$$n_{св.ш} = \frac{b - L_{св}}{L_{св}} + 1$$

$$n_{св.ш} = \frac{15 - 7}{7} + 1 \quad n_{св.ш} = 2$$

общее число светильников в помещении:

$$n_{св} = n_{св.дл} * n_{св.ш} \quad n_{св} = 8$$

план помещения в масштабе

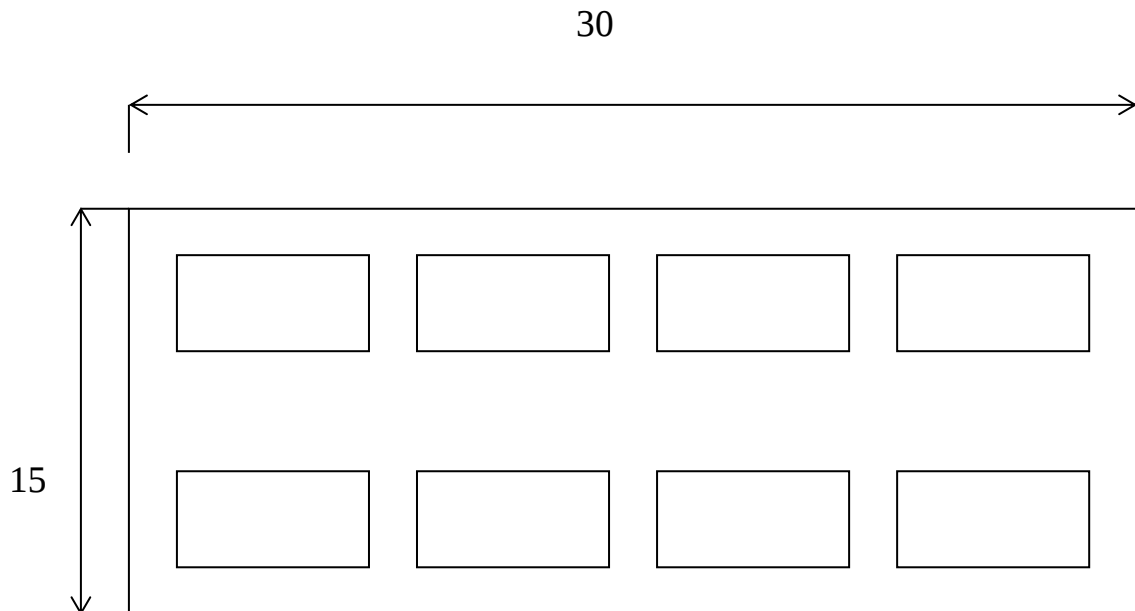


Рисунок 12. План помещения

9.7 Расчет осветительной установки

Расчет производится методом коэффициента использования. Применяя этот метод можно определить световой поток лампы, необходимый для создания заданной освещенности горизонтальной поверхности с учетом света,

отражённого стёклами и потолками. Метод коэффициента использования применяется только при расчете общего равномерного освещения.

Величина светового потока лампы:

$$F = \frac{E \cdot k \cdot S \cdot Z}{N \cdot \eta}, \text{ где}$$

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

h - отношение полного светового потока, достигающего освещаемой поверхности, к полному световому потоку в помещении.

Индекс помещения

$$i = \frac{S}{h \cdot (A + B)} = \frac{150}{4 \cdot (15 + 10)} = 1.5$$

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 $Z = 0.9$ $E = 50$ лк - минимальная нормативная освещённость, принимается по СН и П - П - 4 - 79.

$\eta = 0.5$ - для ламп типа ОДО

$$F = \frac{50 \cdot 1.8 \cdot 150 \cdot 0.9}{3 \cdot 0.5} = 8100 \text{ лм.}$$

Принимаем в каждом светильнике типа ОДО два источника света мощностью по 80 Вт, тогда общая установленная мощность люминесцентных ламп с учетом потерь в пускорегулирующих аппаратах

$$W_{\text{общ}} = n_{\text{ш}} \cdot W_{\text{нес}} \cdot 1.33 = 3 \cdot 280 \cdot 1.33 = 638.4 \text{ Вт} = 0.638 \text{ кВт}$$

9.8 Микроклимат

Большое значение для охраны здоровья и труда человека имеет качество воздуха в производственных помещениях, в частности в рабочих зонах. Рабочей зоной называется пространство, высотой до 2-х метров над уровнем пола или площадки на которых находятся места постоянного или временного пребывания работающих (более 2-х часов непрерывно).

Категория по тяжести труда II б

Эти требования устанавливают оптимальные и допустимые метеорологические условия для рабочей зоны помещения, нормируемые следующими параметрами: температура, оптимальная влажность, скорость движения воздушного потока. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. [14]

Значения перечисленных параметров непосредственно к проектируемому участку приведены в таблице 9.2

Таблица 9.2 – Значения перечисленных параметров

Параметр	Сезон года	
	Холодный	Тёплый
Оптимальная/допустимая температура, °С	17-19/15-22	21-23
Оптимальная/допустимая Относительная влажность, %	60-40/75-15	60-40
Оптимальная/допустимая Скорость движения воздуха, м/с	0,2/0,2-0,4	0,2/0,2-0,5

На рассматриваемом участке при сборке происходит образование пыли и других вредных факторов.

Таблица 9.3 – Образование пыли

Вещества	ПДК, мг/м	Класс опасности	Агрегатное состояние
СО	20	4	Газ
Пыль свинцовая	4	2	Аэрозоль
Пыль	6	4	аэрозоль
Хромовый ангидрид	1	4	аэрозоль

Периодический контроль содержания в воздухе рабочей зоны вредных веществ осуществляется силами заводской лаборатории или санитарно-гигиенической станции.

Шум на производстве - это ещё одна проблема, которая наносит большой экономический и социальный ущерб. Шум не благоприятно воздействует на

организм человека, технические и физиологические нарушения, снижает работоспособность и создаёт предпосылки для общих профессиональных заболеваний и производственного травматизма.

В таблице 9.4 приведены уровни звукового давления, измеренные в восьми октановых полосах со среднегеометрическими частотами.

Таблица 9.4 – Уровень звукового давления

Уровни звукового давления, Дб, в октановых полосах со среднегеометрическими частотами							
63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
99	92	86	83	80	78	78	74

Необходимые условия для снижения шума:

- Всё оборудование, применяемое на участке сборки, для снижения шума установлено на виброопорах.
- На данном участке, при выполнении мероприятий по сокращению проникновения шумов на улицу, световые проёмы целесообразно закладывать стеклоблоками. Вредным производственным фактором является вибрация - механические колебания твёрдых тел, передаваемые организму человека. Они могут быть причиной расстройства сердечно-сосудистой и нервной системы, а так же опорно-двигательной системы человека. Измерение вибрации производится прибором ШШ-В1, снабженным датчиком вибрации. Нормативным документом рассматривающим уровни шума для различных категорий рабочих мест, служебных помещений является ГОСТ 12.1.003-83. [10]

9.9 Техника безопасности слесаря электрических машин

1. К самостоятельной работе слесаря эл.машин допускаются лица прошедшие медицинское освидетельствование, курсовое обучения по теоретическим

знаниям и практическим навыкам в работе в объёме программы, аттестацию квалификационной комиссии и инструктаж по охране труда на рабочем месте.

2. Первичный инструктаж рабочий получает на рабочем месте до начала производственной деятельности. Первичный инструктаж производит мастер цеха. Повторный инструктаж рабочий получает - ежеквартально.
3. После первичного инструктажа в течении первых двух – пяти смен должен выполнять работу под наблюдением мастера, либо наставника, после чего оформляется допуск к самостоятельной работе, который фиксируется датой и подписью инструктирующего и инструктируемого в журнале инструктажа.
4. Слесарь использует резцовый инструмент и грузоподъёмные механизмы, поэтому предъявляются повышенные требования и они раз в три года проходят обучение в объёме знаний программы и инструкций по охране труда.
5. Рабочий должен работать в спецодежде:
 - Костюм ХБ ГОСТ 27575-87 Ми;
 - Перчатки ХБ вязанные ГОСТ 5007-87 Ми;
 - Ботинки кожаные с металлическим носком ГОСТ 28807-90 Мун;
 - Рукавицы комбинированные ГОСТ 124010-75.
6. Необходимо соблюдать:
 - Правила внутреннего распорядка, не допускать распития спиртных напитков
 - Правила личной гигиены (работать в спецодежде, спецобуви и других СИЗ, пищу принимать только в отведённых для этих целей помещениях)
 - Курить разрешается в специально отведённых местах
7. Соблюдать производственную и технологическую дисциплину, при выполнении работ быть внимательным не отвлекаться посторонними делами и не отвлекать других. Выполнять только ту работу, которая поручена мастером.

8. При получении травмы или недомогании нужно немедленно обратиться в здравпункт и по возможности в течении суток сообщить мастеру или начальнику цеха.

9. За не соблюдение требований инструкции по охране труда рабочий несёт дисциплинарное взыскание и материальное:

- Перевод на нижеоплачиваемую должность сроком до 3-х месяцев
- Уголовную ответственность

9.10 Требования безопасности перед началом работы.

1. Надеть спецодежду, спецобувь и другие средства индивидуальной защиты.
2. Проверить общее состояние рабочего места и убедиться, что проходы не загромождены, освещены и нет выбоин на полу.
3. Работать инструментом, отвечающим требованиям ГОСТ 12.2.027-80:
 - Молотки, зубила, бородки, обжимки, керны и т.д. не должны иметь скошенных бойков и заусенцы;
 - Гаечные ключи должны быть исправными и соответствовать размерам болтов и гаек; Наращивать ключи другими предметами запрещается.
4. Проверить исправность тележки, конвейера и зажимных приспособлений.
5. Проверить исправность проводов и шлангов (нет ли утечки масла).
6. При работе с грузоподъёмными механизмами нужно проверить их исправность (тормоза, состояния троса, ограничителя подъёма высоты и станцию (пульт) управления на передвижения тельфера и наличия заземления).
7. О всех обнаруженных неисправностях сообщить мастеру и до его указания к работе не приступать.
8. К работе с электроинструментом допускаются лица, прошедшие инструктаж по II группе безопасности.

9. Выполнять только ту работу, которая поручена мастером или начальником цеха.
10. Не загромождать рабочее место деталями. Своевременно убирать бракованные детали, не допуская их накопления.
11. Установку и съём тяжёлых деталей производить с помощью другого рабочего или грузоподъёмных механизмов и приспособлений.
12. Пользоваться только исправным инструментом, предусмотренным для данных работ технологической картой.
13. При работе с абразивным кругом, пользоваться защитными очками.
14. Не останавливать вращающийся инструмент руками или каким-либо предметом.
15. При опрессовке узлов, их испытаниях на пневматических приспособлениях съём и укладку изделий производить только при полной неподвижности штока, не производить самостоятельно наладку и исправления пресса.
16. Детали укладывать в специальную тару или в стеллажи, если складирование производится на полу, то укладывать детали надо устойчиво, высота штабеля должна быть не более 1м, как указано в техпроцессе.
17. При работе на гидравлических прессах устанавливать запрессованные детали строго вертикально, без перекосов, т.к. они могут вылететь в сторону.
18. К работе с бензином и легко-воспламеняющимися веществами допускаются лица, прошедшие специальный инструктаж по технике безопасности и противопожарным правилам.
19. Тара должна иметь номер и указания наибольшего веса груза для транспортировки которого она предназначена. Ёмкость тары должна исключать возможность перегрузки грузоподъёмной машины.
20. Лицам, моложе 18-ти лет запрещается работать с грузоподъёмными механизмами.

9.11 Пожарная безопасность

Участок сборки асинхронного двигателя согласно НПБ - 105 - 03 ГОСТ 12.1.004 – 91 ССБТ. относится к категории «Д», т.е. это производство в котором обрабатываются негорючие вещества и материалы в холодном состоянии. [15]

Лица, не прошедшие противопожарный инструктаж к работе не допускаются. Каждый работающий на объединении, не зависимо, от занимаемой должности должен знать и строго соблюдать установленные правила пожарной безопасности не допускать действий могущих привести к пожару или загоранию.

Лица, виновные в нарушении настоящих правил, в зависимости от характера нарушений и их последствий, несут ответственность в установленном законом порядке - в дисциплинарном, административном или судебном порядке.

9.12 Содержание зданий и помещений на объединении

Содержание зданий и помещений на объединении состоит из:

- на входных дверях производственных помещений, складах должны быть вывешены категории взрывопожароопасной (А,Б,В,Г,Д,Е)
- все производственные и вспомогательные помещения должны 1 раз в смену очищаться от промышленных отходов и горючих материалов.
- проходы, тамбуры, выхода, коридоры, лестничные клетки не разрешается загромождать.
- все выхода должны открываться по направлению из здания, помещения.
- хранение в цехах сырья, полуфабрикатов, горючих жидкостей разрешается только не более суточной, сменной потребности.

- использовать ГЖ (горючесмазочная жидкость) и ЛВЖ (легковоспламеняющаяся жидкость) для мойки деталей и узлов запрещается.
- для использованных обтирочных материалов должны быть установлены металлические ящики с крышкой. По окончании смены они должны очищаться.
- сварочные работы, и другие огневые работы в складах и производственных помещениях должны производиться только по письменному разрешению и согласовываться с пожарной охраной, с соблюдением всех указанных мероприятий. [16]

9.13 Каждый работающий на объединении должен знать

- при обнаружении пожара или загорания вызвать пожарную помощь и принять меры у ликвидации очага пожара или действовать по указанию старшего начальника или начальника ДПД.
- знать пути эвакуации из помещения.
- знать пожароопасность своего цеха, участка и при обнаружении нарушений противопожарного характера устранить их или сообщить начальнику цеха.
- знать и уметь пользоваться первичными средствами пожаротушения.

Огнетушители ОП-5, ОП-2 - порошковые, предназначены для тушения загорания установок под напряжением до 1000В. При загорании снять огнетушитель, поднести к загоранию, выдернуть чеку и нажать на клавиш, а затем направить пистолет на огонь.

Стационарная пенная установка - предназначена для тушения загорания различных веществ, за исключением щелочных и щелочноземельных веществ. При загорании размотать рукав, открыть вентили вода, воздух и направить пожарный рукав на огонь.

Ввиду наличия стационарной пенной установки пожарный щит не используем.

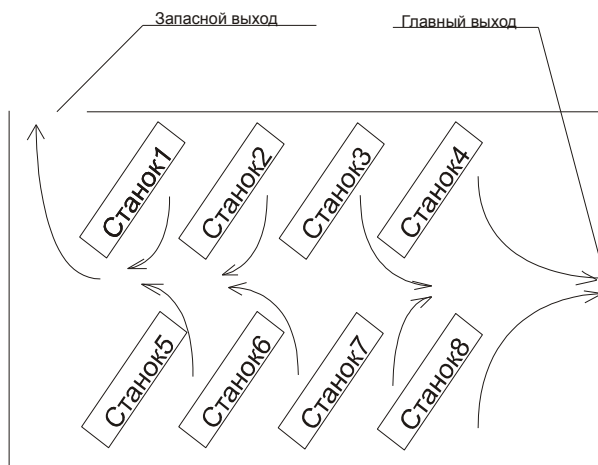


Рисунок 13. План эвакуации

9.14 Охрана окружающей среды

Защита окружающей среды - это комплексная проблема, требующая усилия учёных многих специальностей. Наиболее активной формой защиты окружающей среды от вредного воздействия выбросов промышленных предприятий, является полный переход к безотходным и малоотходным технологиям и производствам. Это требует решения целого комплекса сложных технологических и конструктивных задач, основанных на исследовании новейших научно-технологических достижений.

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.).

Заключение

В данной работе был спроектирован трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для частотного регулирования. В качестве базовой модели выбрана конструкция асинхронных двигателей серии 4А, которые предназначены для наиболее широкого применения в различных отраслях народного хозяйства.

В начале расчета двигателя были получены значения электромагнитных нагрузок A и B_δ , входящие в рекомендуемые пределы, основанные на исследовании работающих двигателей серии 4А. От электромагнитных нагрузок зависят не только размеры машины, а также и ее характеристики. Число пазов статора принято стандартному и равно $Z_1=48$, т.е. обмотка имеет целое число пазов на полюс и фазу ($q=4$).

Плотность тока в обмотке статора получилась значительной, что характерно для двигателей небольшой и средней мощности. Для обмотки статора используется стандартный эмалированный провод с диаметром $d_{из}=1,33\text{мм}$, это позволяет применять механизированную укладку обмотки, коэффициент заполнения паза соответствует механизированной укладке. В расчете зубцовой зоны статора была принята конфигурация пазов, при которой зубцы имеют постоянное поперечное сечение по всей высоте, т.е. в зубцах не будет участков с разной индукцией.

Воздушный зазор был выбран небольшим, что приводит к уменьшению магнитодвижущей силы магнитной цепи и тока намагничивания. При этом будут уменьшаться суммарные потери, благодаря чему в расчете рабочих характеристик повысились значения $\cos\varphi$ и КПД. Число пазов ротора выбрано по рекомендациям, основанным на изучении влияния соотношений числа зубцов статора и ротора на кривую момента, а также шумы и вибрации. Пазы ротора выполнены без скоса. При расчете рабочих характеристик получили уточненные значения номинального тока обмотки статора и мощности,

потребляемой двигателем, которые меньше, чем принятые вначале работы предварительно.

В расчете пусковых характеристик кратность пускового тока получилась в допустимых пределах, установленных стандартом (ГОСТ 19523 - 74), а пусковой момент удовлетворяющим техническому заданию, его кратность превысила заданного значения. Это явилось следствием таких факторов, как довольно высокое сопротивление фазы обмотки ротора, высокая и тонкая форма пазов ротора, в которых более сильно проявляется эффект вытеснения тока, проявляющегося в результате действия потока пазового рассеяния. Таким образом можно задавать пусковой момент меняя плотность тока в обмотке ротора или индукцию в зубцах ротора.

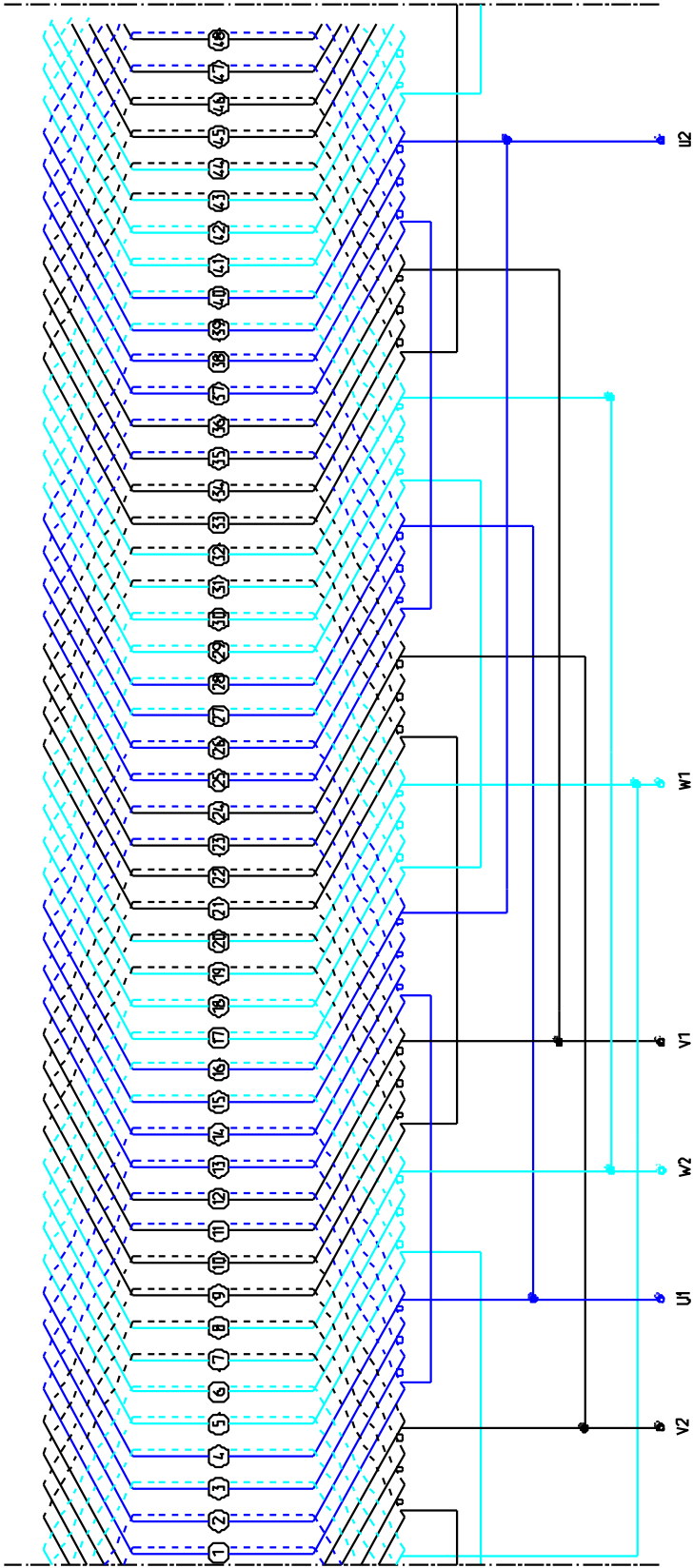
Тепловой расчет показал, что у двигателя имеется небольшой температурный запас по температуре нагрева обмотки статора (для класса изоляции F), а вентилятор обеспечивает расход воздуха почти с двукратным запасом.

Спроектированный двигатель отвечает поставленным в техническом задании требованиям.

Список использованных источников

1. Проектирование электрических машин: Учеб. пособие для вузов/ И.П. Копылов, Ф.А. Горяинов, Б.К. Клоков и др.; Под ред. И.П. Копылова М.: Энергия, 1980.-496с.
2. Технология производства асинхронных двигателей: Специальные процессы/ В.Г.Костромин, С.Б. Воронин, В.А. Дагаев и др.; Под ред. В.Г.Костромина.- М.: Энергоиздат, 1981.-272с.
3. Антонов М.В. Технология производства электрических машин. -М: Энергоиздат, 1982. 512 с.
4. Амиров Ю.Д. Технологичность конструкции изделия. Справочник.-М.: Машиностроение,1990. 768 с.
5. Миллер Э.Э. техническое нормирование труда в машиностроении.-М: Машиностроение, 1972. 248 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х томах. Т1
Под ред. А.Г.Косиловой, Р.К.Мещерякова - М.: Машиностроение,1983
7. Экономика предприятия: Учебник для вузов / Под ред. проф. В.Я. Горфинкеля. – М.: Банки и биржи, ЮНИТИ, 2006. – 742с.
8. Фатхудинов Р. А. Производственный менеджмент. 203 – 491с.:ил, 4-е издание.
9. Электронный ресурс. <http://www.res-elektro.ru/catalog/elektrodvigateli/air/>
10. ГОСТ 12. 1. 003 – 83 (1999) ССБТ. Шум. Общие требования безопасности.
11. ГОСТ 12. 0. 003 – 74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация.
12. ГОСТ 12. 1.005 – 88 (с изм. №1 от 2000г.). ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (01. 01.89).
13. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. ГОСТ 12. 1.004 – 91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования

14. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
15. ГОСТ 12. 1.004 – 91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования
16. НПБ 105-2003 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности

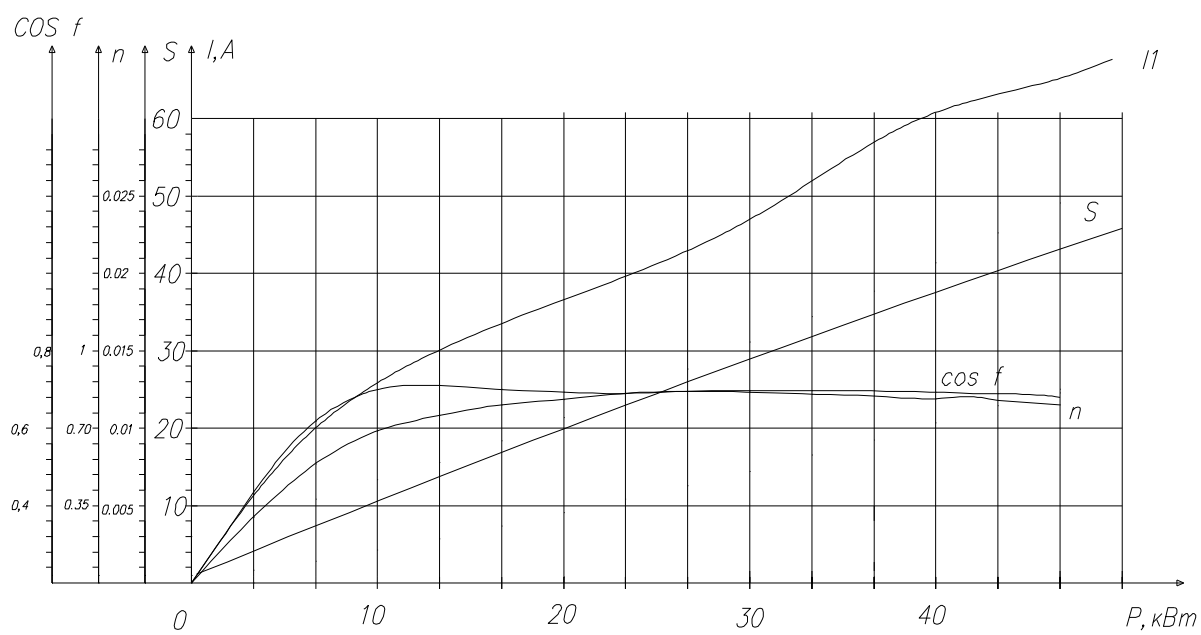


Шаг по полюсам $y = 1 - 11$
Число фаз $m = 3$
Число параллельных ветвей $q = 2$

Число полюсов $Z = 48$
Число полюсов на фазу $2p = 4$
Число полюсов на фазу $q = 4$

Таблица. 1 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Расчётные формулы	Размерность	Скольжение s						$s_{ном}$
		0,005	0,01	0,015	0,02	0,025	0,03	0,019
$a' \cdot r'_2 / s'$	Ом	13,124	6,562	4,375	3,281	2,625	2,187	3,454
$R = a + a' \cdot r'_2 / s$	Ом	13,238	6,676	4,489	3,395	2,739	2,301	3,568
$X = b + b' \cdot r'_2 / s$	Ом	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813	0,813
$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	13,263	6,725	4,562	3,491	2,857	2,441	3,659
$I''_2 = U_{ном} / Z$	А	16,587	32,712	48,227	63,018	77,004	90,134	60,122
$\cos \varphi'_2 = R / Z$	-	0,998	0,993	0,984	0,972	0,959	0,943	0,975
$\sin \varphi'_2 = X / Z$	-	0,061	0,121	0,178	0,233	0,285	0,333	0,222
$I_{1a} = I_{0a} + I''_2 \cdot \cos \varphi'_2$	А	17,564	33,48	48,462	62,292	74,826	85,991	59,626
$I_{1p} = I_{0p} + I''_2 \cdot \sin \varphi'_2$	А	21,537	24,476	29,118	35,202	42,442	50,555	33,833
$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	27,791	41,472	56,537	71,55	86,024	99,751	68,581
$I'_2 = c_1 \cdot I''_2$	А	17,409	34,331	50,615	66,138	80,816	94,597	63,009
$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	11,592	22,097	31,985	46,113	49,385	56,754	43,353
$P_{\varphi 1} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,252	0,56	1,041	1,667	2,41	3,241	1,532
$P_{\varphi 2} = 3 \cdot I'^2_2 \cdot r'_2 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,054	0,211	0,458	0,782	1,167	1,599	0,712
$P_{доб} = 0,005 \cdot P_1$	кВт	0,058	0,11	0,16	0,206	0,247	0,284	0,197
$\sum P = (P_{cm} + P_{мех} + P_{\varphi 1} + P_{\varphi 2} + P_{доб}) \cdot 10^{-3}$	кВт	1,279	1,797	2,574	3,57	4,74	6,039	3,355
$P_2 = (P_1 - \sum P) \cdot 10^{-3}$	кВт	10,314	20,3	29,411	42,543	44,645	50,715	39,998
$\eta = 1 - \sum P / P_1$	-	0,89	0,919	0,92	0,913	0,904	0,894	0,915
$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	-	0,632	0,807	0,857	0,871	0,87	0,862	0,869

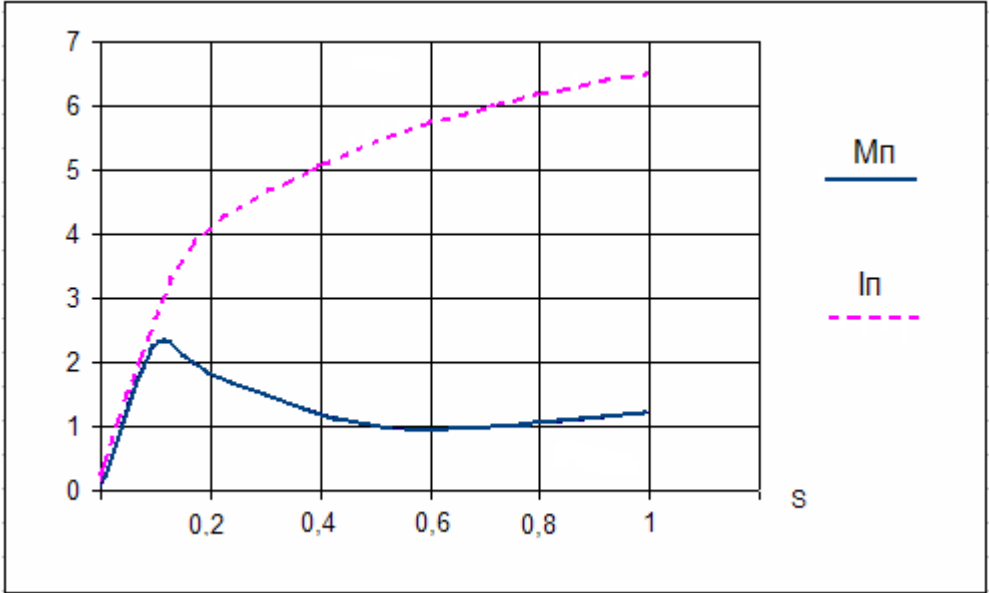


ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица. 2 – Пусковые характеристики двигателя

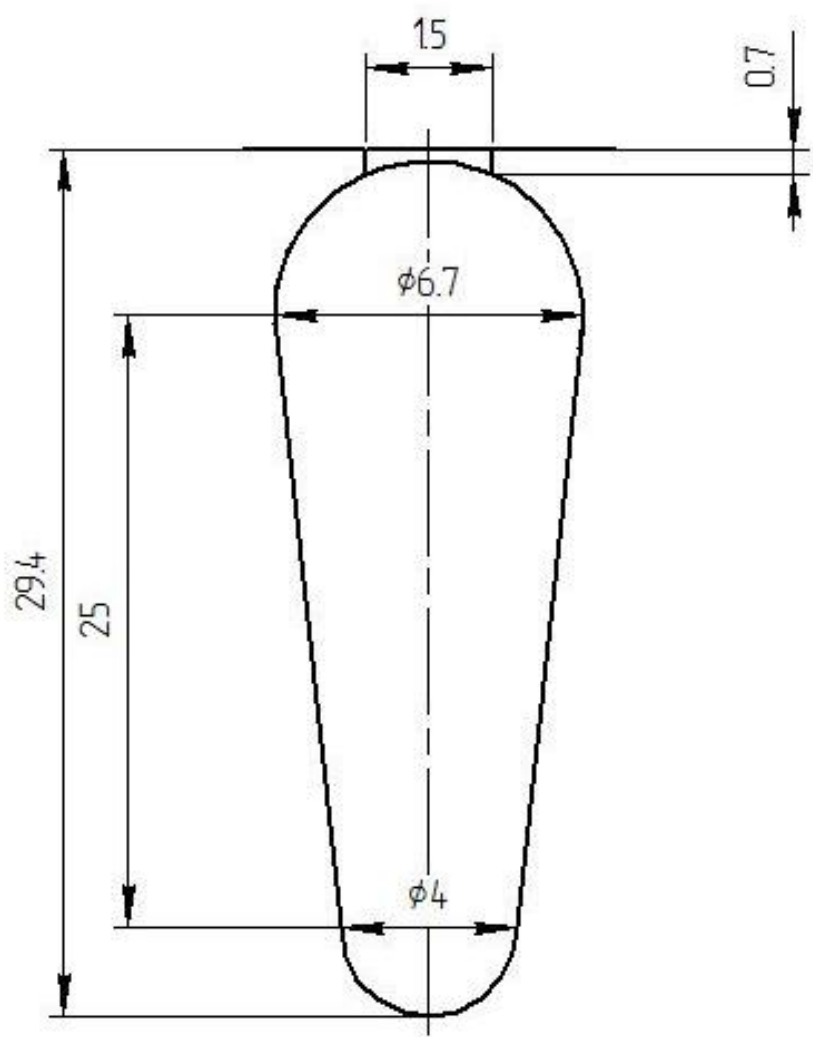
Расчётные формулы	Размерность	Скольжение					
		1.00	0.8	0.5	0.2	0.1	0.106
$k_{нас}$	-	1.35	1.3	1.2	1.1	1.05	1
$F_{П.ср} = 0.7 \cdot \frac{I_1 \cdot k_{нас} \cdot U_{П.}}{a} \cdot \left(k'_{\beta} + k_{y1} \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	3870	3701	3346	2805	2209	144,807
$B_{\phi\delta} = \frac{F_{П.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	2,845	2,721	2,459	2,062	1,624	0,106
$k_{\delta} = f(B_{\phi\delta})$	-	0.73	0.75	0.8	0.87	0.9	0.97
$c_{\gamma 1} = \overline{c_{\gamma 1} - b_{и1}} \cdot \overline{c_{\gamma 1} - k_{\delta}}$	мм	3,079	2,851	2,281	1,482	1,14	0,342
$\lambda_{П1нас} = \lambda_{П1} - \Delta\lambda_{П1нас}$	-	2,224	2,235	2,263	2,312	2,336	2,403
$\lambda_{Д1нас} = \lambda_{Д1} \cdot k_{\delta}$	-	2,216	2,276	2,428	2,641	2,732	2,944
$x_{1нас} = x_1 \cdot \sum \lambda_{1нас} / \sum \lambda_1$	Ом	0,428	0,433	0,447	0,467	0,475	0,496
$c_{1Пнас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12П}}$	-	1.028	1.029	1.029	1.031	1.031	1.033
$c_{\gamma 2} = \overline{c_{\gamma 2} - b_{и2}} \cdot \overline{c_{\gamma 2} - k_{\delta}}$	мм	3,066	2,839	2,271	1,476	1,136	0,341
$\lambda_{П2\xi нас} = \lambda_{П2\xi} - \Delta\lambda_{П2нас}$	-	1,944	2,008	2,147	2,257	2,314	2,49
$\lambda_{Д2нас} = \lambda_{Д2} \cdot k_{\delta}$	-	0,862	0,886	0,945	1,028	1,063	1,146
$x'_{2\xi нас} = x'_{2'} \cdot \sum \lambda_{2\xi нас} / \sum \lambda_2$	Ом	0,202	0,207	0,217	0,228	0,233	0,247
$R_{Пнас} = r_1 + c_{1П.нас} \cdot r'_{2\xi} / s$	Ом	0,189	0,2	0,241	0,425	0,737	62,203
$I'_{2нас} = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{Пнас}^2 + X_{Пнас}^2}}$	А	331,797	325,411	308,747	268,199	214,215	3,537
$I_{1нас} = I'_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{Пнас}^2 + (X_{Пнас} + x_{12П})^2}}{c_{1Пнас} \cdot X_{12П}}$	А	336,225	329,859	313,198	272,317	217,73	14,466
$k'_{нас} = I_{1нас} / I_1$	-	1,327	1,325	1,32	1,315	1,312	1.310

$I_{II*} = I_1 / I_{I_{HOM}}$	-	6,498	6,202	5,51	3,954	3,161	0,21
$M_{II*} = \left(\frac{I'_{2II_{HAC}}}{I'_{2HOM}} \right)^2 \cdot K_R \cdot \frac{s_{HOM}}{s}$	-	1,207	1,069	0,995	1,798	2,275	2,275



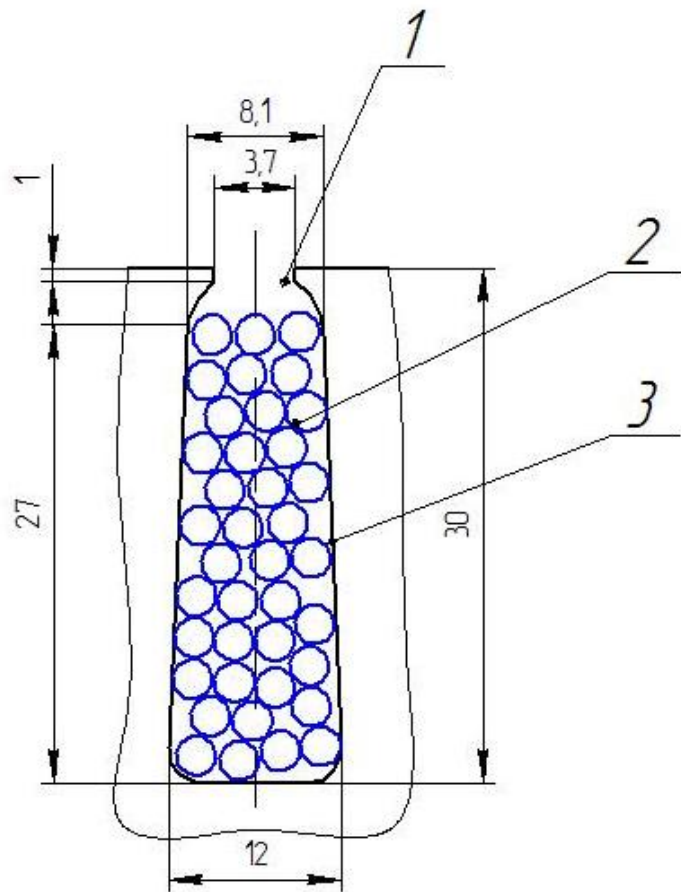
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Эскиз паза ротора в штампе, размеры в мм



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

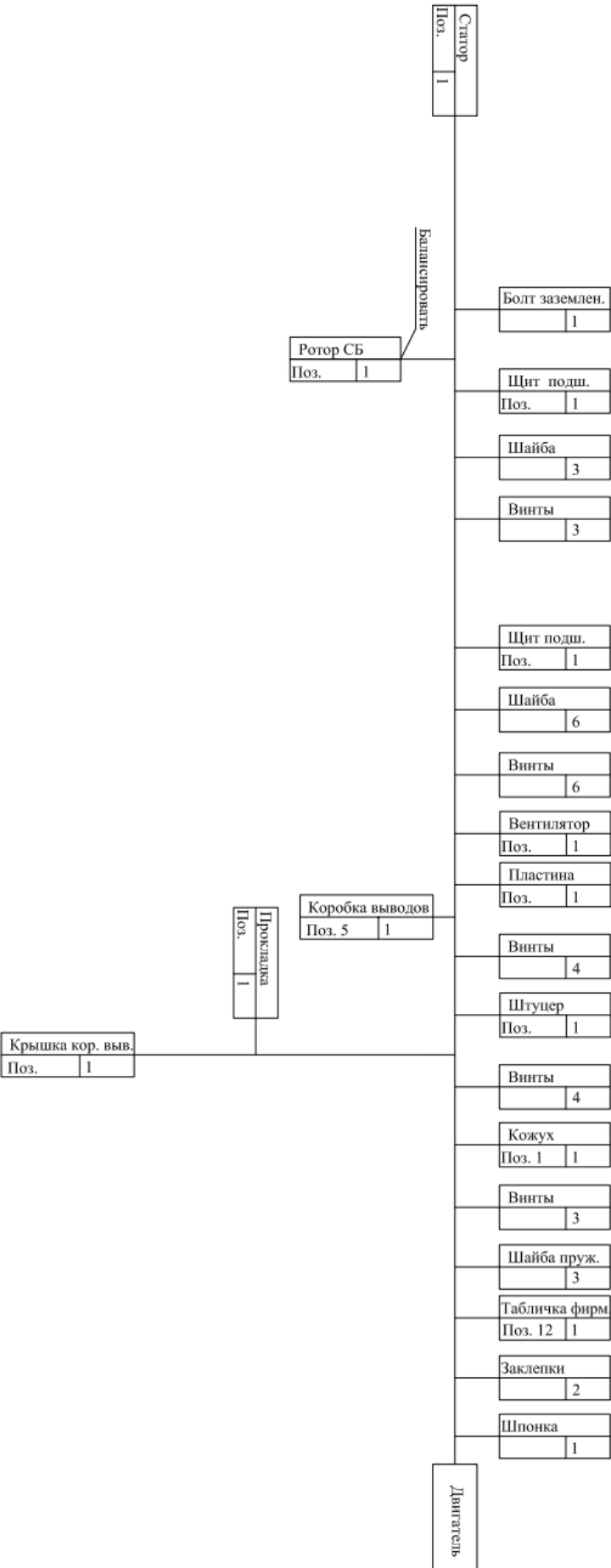
Эскиз паза статора в штампе с заполнением, размеры в мм



Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол	Примечание
		1		Изоляция		Имодофлекс
		2		проводники		медь
		3		Изоляции паза		Изофлекс

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Схема сборки Асинхронного двигателя



[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

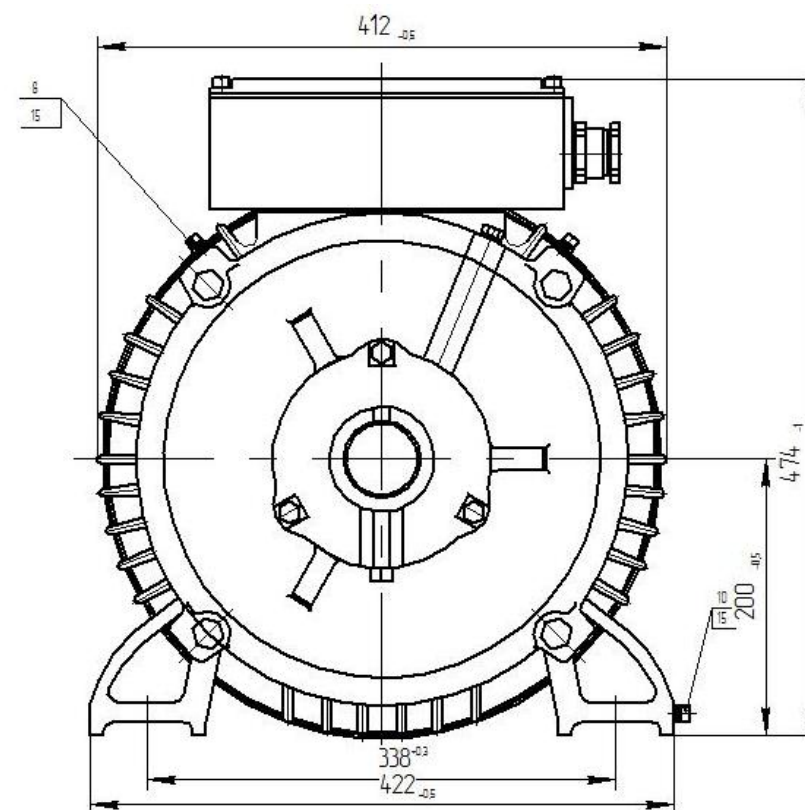
[illegible]

[illegible]

	2
--	---

ФЮРА.526622.011

Асинхронный двигатель



10
