

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

---

Институт Электронного обучения

Специальность 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра Электротехнических комплексов и материалов

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Асинхронный двигатель для привода вентилятора

УДК 621.313.333.2:621.63.001.6

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Суянов Хакимжон Алишер угли		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гирник А.С.	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
Старший преподаватель	Романцов И.И.	к.т.н.		

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	Гирник А.С.	к.т.н., доцент		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

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

Томск – 2016 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
<b><i>Профессиональные компетенции</i></b>	
P1	Применять <i>базовые и специальные</i> математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания в <i>широком</i> (в том числе междисциплинарном) контексте в <i>комплексной</i> инженерной деятельности
P2	Ставить и решать задачи <i>комплексного</i> инженерного анализа с использованием <i>базовых и специальных</i> знаний, современных аналитических методов и моделей
P3	Выполнять <i>комплексные</i> инженерные проекты с применением <i>базовых и специальных</i> знаний, <i>современных</i> методов проектирования для достижения <i>оптимальных</i> результатов, соответствующих техническому заданию с <i>учетом</i> экономических, экологических, социальных и других ограничений
P4	Проводить <i>комплексные</i> инженерные исследования, включая поиск необходимой информации, эксперимент, анализ и интерпретацию данных с применением <i>базовых и специальных</i> знаний и <i>современных</i> методов для достижения требуемых результатов
P5	Выбирать и использовать на основе <i>базовых и специальных</i> знаний необходимое оборудование, инструменты и технологии для ведения <i>комплексной</i> практической инженерной деятельности с <i>учетом</i> экономических, экологических, социальных и других ограничений
P6	Демонстрировать особые компетенции, связанные с уникальностью задач, объектов и видов <i>комплексной</i> инженерной деятельности в <i>области специализации</i> (научно-исследовательская, производственно-технологическая, организационно-управленческая, проектная и др.) на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях, а также <i>готовность</i> следовать их корпоративной культуре
<b><i>Универсальные компетенции</i></b>	
P7	Использовать <i>базовые и специальные</i> знания в области проектного менеджмента и практики ведения бизнеса, в том числе менеджмента рисков и изменений, для ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности
P8	Осуществлять коммуникации в профессиональной среде и в обществе в целом, в том числе <i>на иностранном языке</i> , разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты <i>комплексной</i> инженерной деятельности
P9	Эффективно работать индивидуально и <i>в качестве члена команды</i> , в том числе междисциплинарной, с делением ответственности и полномочий при решении <i>комплексных</i> инженерных задач
P10	Демонстрировать <i>личную</i> ответственность, приверженность и готовность следовать профессиональной этике и нормам ведения <i>комплексной</i> инженерной деятельности
P11	Демонстрировать знание правовых, социальных, экологических и культурных аспектов <i>комплексной</i> инженерной деятельности, <i>осведомленность</i> в вопросах охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности
P12	Осознавать необходимость и демонстрировать <i>способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни</i> и непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии

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

Институт Электронного обучения

Направление подготовки (специальность) 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Кафедра Электротехнических комплексов и материалов

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. Кафедрой

\_\_\_\_\_ А.Г. Гарганеев  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г11	Суюнову Хакимжону Алишер Угли

Тема работы:

Асинхронный двигатель для привода вентилятора
Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Номинальная мощность <math>P_n=37\text{кВт}</math>;                  Номинальное напряжение <math>U_n=220/380\text{В}</math>;                  Число полюсов <math>2p = 4</math>;                  Число фаз <math>m=3</math>;                  Высота оси вращения <math>h=0,200\text{ м}</math>;                  Номинальная частота питания <math>f_n=50\text{ Гц}</math>;                  Температура окружающей среды <math>+40^\circ\text{C}</math>;                  Режим работы – продолжительный (S1);                  Способ монтажа IM1001;                  Способ охлаждения ICA03;                  Степень защиты IP44.</p>
<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Электромагнитный расчёт.</li> <li>2. Тепловой расчёт.</li> <li>3. Вентиляционный расчёт.</li> <li>4. Механический расчёт.</li> <li>5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.</li> <li>6. Социальная ответственность.</li> </ol>

<b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	1. Презентация в программе Microsoft Power Point. 2. Сборочный чертеж двигателя. 3. Электромагнитный расчет: схема обмотки статора, характеристики. 4. Детализовка. 5. Технологическая часть. 6. План помещения и размещения светильников.
---	---

<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b> <i>(с указанием разделов)</i>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
«Основной раздел ВКР»	Гирник А.С.
«Технология»	Баранов П.Р.
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Мелик-Гайказян М.В.
«Социальная ответственность»	Романцов И.И.

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	23.11.2015 г.
---	---------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гирник А.С.	к.т.н., доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Суюнов Х.А.		

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

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
З-5Г11	Суюнову Хакимжону Алишер угли

<b>Институт</b>	<b>ИнЭО</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭКМ</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**Исходные данные к разделу «Технологический процесс общей сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором»:**

1. Сборочный чертеж асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, спецификация;
2. Годовая программа выпуска изделия 11500 штук

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

- |  |  |
|--|--|
| 1. Анализ конструкции электрической машины на технологичность                        | 2. Составить схему сборки электрической машины                   |
| 3. Выбрать оборудование, приспособления для сборки и испытаниям электрической машины | 4. Разработать маршрутную технологию сборки электрической машины |
| 5. Определить нормы времени на операции и оборудование                               | 6. Построить график загрузки оборудования                        |

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

1. График безубыточности для данного вида продукции.

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

15.09.2015

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент	Баранов П.Р.	к.т.н, доцент		10.01.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
З-5Г11	Суюнов Х.А.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
3-5Г11	Суюнову Хакимжону Алишер угли

<b>Институт</b>	<b>ИнЭО</b>	<b>Кафедра</b>	<b>ЭКМ</b>
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

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

1. <i>Стоимость ресурсов:</i>	<i>Стоимость материалов, технического оборудования, информационных и трудовых ресурсов</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»</i>
1. <i>Используемая система налогообложения</i>	<i>Отчисления во внебюджетные-страховые фонды (30,7% от заработной платы)</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала инженерных решений</i>	<i>Определение конкурентоспособности проекта, анализ рынка продукта</i>
2. <i>Оценка целесообразности производства двигателя</i>	<i>Определение себестоимости, рентабельности и критического объема продукции</i>
3. <i>Оценка ресурсной эффективности продукции</i>	<i>Расчет экономии затрат на силовую электроэнергию при эксплуатации</i>

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей)

1. <i>График безубыточности для данного вида продукции.</i>
---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	24.04.2016
---	------------

**Задание выдал консультант:**

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

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
3-5Г11	Суюнов Х.А.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г11	Суюнову Хакимжону Алишер угли

Институт	ИнЭО	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

<p>- Описание рабочего места (рабочей зоны, технологического процесса, механического оборудования) на предмет возникновения:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- вредных проявлений факторов производственной среды (метеоусловия, вредные вещества, освещение, шумы, вибрации, электромагнитные поля, ионизирующие излучения)</li> <li>- опасных проявлений факторов производственной среды (механической природы, термического характера, электрической, пожарной и взрывной природы)</li> <li>- негативного воздействия на окружающую природную среду (атмосферу, гидросферу, литосферу)</li> <li>- чрезвычайных ситуаций (техногенного, стихийного, экологического и социального характера)</li> </ul>	<p>Рабочим местом является цех общей сборки асинхронных двигателей с КЗ ротором. На рабочем месте имеется ряд вредных факторов: повышенный уровень вибраций, повышенный уровень шума, недостаточное освещенность, микроклимат. Кроме того, работники могут подвергаться действию опасных факторов: движущимся механизмам для обработки деталей, поражение электрическим током, возникновение пожаров.</p>
<p>- Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</p>	<p>ГОСТ 28807-90; ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ; СанПиН 2.2.4.548-96; ГОСТ 27575-87; ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ; ГОСТ 12.1.033-81.</p>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>- действие фактора на организм человека;</li> <li>- приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>- предлагаемые средства защиты (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства)</li> </ul>	<p>Выявленные вредные факторы производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- повышенный уровень вибрации на рабочем месте;</li> <li>- повышенный уровень шума на рабочем месте;</li> <li>- недостаточная освещенность рабочей зоны;</li> <li>- пыль и другие вредные вещества;</li> <li>- микроклимат;</li> <li>- тепловое излучение при обработке детали;</li> </ul>
<p>1. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>- термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>- электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> <li>- пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения)</li> </ul>	<p>Выявленные опасные факторы производственной среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- движущиеся механизмы для обработки детали;</li> <li>- вращающиеся механизмы и оборудования для обработки детали;</li> <li>- разработка и осуществление мер по пожарной безопасности;</li> </ul>
<p>2. Охрана окружающей среды:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- защита селитебной зоны</li> <li>- анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>- анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> </ul>	<p>Анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); Разработка и принятие решения по обеспечению экологической безопасности предприятия</p>

- разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.	
3. Защита в чрезвычайных ситуациях: - перечень возможных ЧС на объекте; - выбор наиболее типичной ЧС; - разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; - разработка мер по повышению устойчивости объекта к данной ЧС; - разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий	Наиболее вероятным ЧС при сборке асинхронного двигателя является пожар на рабочем месте.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: - специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; - организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны	- ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация - ГОСТ 12.0.004-90 ССБТ. Обучение работающих безопасности труда - ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность Общие требования (01.07.92) - безопасность. Общие требования - СанПиН 2.2.4.548-96. Защита от теплового излучения
<b>Перечень графического материала:</b>	
При необходимости представить эскизные графические материалы к расчётному заданию (обязательно для специалистов и магистров)	- Рисунок 7.2 - План эвакуации

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Романцов И.И.	к.т.н.		16.05.2016

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г11	Суюнов Х.А.		16.05.2016

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа 129 стр., 4 рисунков, 16 таблиц, 25 источника, 5 приложение, 4 лист. графического материала.

Ключевые слова: ДВИГАТЕЛЬ АСИНХРОННЫЙ, КОРОТКОЗАМКНУТЫЙ РОТОР, СТАТОР, ДВУХСЛОЙНАЯ ОБМОТКА СТАТОРА, ИЗОЛЯЦИЯ, РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Объектом проектирования является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором.

Цель работы – приобретение практических навыков в проектировании электрической машины.

В процессе работы спроектирован асинхронный двигатель для привода вентилятора, а именно: рассчитаны главные размеры, выбраны обмотки статора и ротора, обмоточные провода, изоляция, рассчитаны рабочие характеристики, произведен механический расчет вала и тепловой расчет двигателя. Также разработан технологический процесс общей сборки, рассчитана себестоимость спроектированного двигателя, оценена безопасность и экологичность проекта.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2016, чертежи выполнены в графическом редакторе КОМПАС-3D V16.1.

## **Введение**

Асинхронные машины – наиболее распространённые электрические машины. Особенно широко они применяются как электродвигатели, являются основными преобразователями электрической энергии в механическую. Применение асинхронных двигателей в качестве электропривода подавляющего большинства механизмов объясняется простотой конструкции, надёжностью и высоким значением КПД этих машин.

Важнейшим требованием при изготовлении и проектировании двигателей является минимальная материалоемкость электрических машин. Экономия материалов связана с безотходной и малоотходной технологией. Электрические машины с безотходной технологией изготовления имеют преимущества перед обычными машинами.

Проектируемая электрическая машина должна иметь высокие показатели (КПД и  $\cos\phi$ ). Электрические машины с минимальными потерями позволяют уменьшить вложение материалов в энергосистему. Высокие энергетические показатели электрической машины гарантируют снижение уровня текущих затрат на эксплуатацию и капитальные вложения. Вновь разрабатываемые электрические двигатели должны соответствовать, быть надёжными и иметь срок службы 8-10 лет.

С 1946 года асинхронные двигатели выпускаются едиными сериями. Это значительно облегчает выбор, установку, обслуживание и ремонт электрооборудования. В 70-х годах была разработана и внедрена единая серия асинхронных двигателей 4А. Одновременно с конструкцией двигателей разрабатывались электротехническая сталь, провода, изоляция и технология. В 80-х годах организацией социалистических стран «Интерэлектро» разработана новая унифицированная серия асинхронных двигателей АИ, предназначенная для использования во всех странах-членах СЭВ. Машины серии АИ, которые производятся во всех этих странах, отличаются повышенными надёжностью и перегрузочной способностью,

расширенным диапазоном регулирования, лучшими массогабаритными и энергетическими показателями, а также улучшенными виброакустическими характеристиками по сравнению с машинами серии 4А.

## Содержание

Введение	10
1. Электромагнитный расчёт	14
1.1 Выбор главных размеров	14
1.2 Расчёт обмотки статора	16
1.3 Расчёт размеров зубцовой зоны статора	19
1.4 Расчёт ротора	22
1.5 Расчёт магнитной цепи	26
1.6 Параметры рабочего режима	30
1.7 Расчёт потерь	36
1.8 Расчёт рабочих характеристик	40
1.9 Расчёт пусковых характеристик	45
2 Тепловой расчёт	59
3 Вентиляционный расчёт	62
4 Механический расчёт	63
4.1 Расчет вала на жесткость	66
4.2 Определение критической частоты вращения	69
5 Технологическая часть	73
5.1 Служебное назначение и особенности конструкции электрической машины	74
5.2 Оценка технологичности конструкции	76
5.3 Составление схемы сборки и маршрутной технологии общей сборки электрической машин	79
5.4 Выбор сборочного оборудования и оснастки	80
5.5 Нормирование сборочных работ и расчет количества технологического оборудования для обеспечения заданной программы	81
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	88
6.1 Анализ потенциальных рисков и разработка мер по управлению ими	88
6.2 Оценка конкурентоспособности проектируемого двигателя	90
6.3 Расчёт себестоимости производства двигателя	92
6.3.1 Материальные затраты	92
6.3.2 Расходы на электроэнергию	94
6.3.3 Полная заработная плата технологических рабочих	95
6.3.4 Отчисление во внебюджетные фонды	96

6.3.5 Накладные расходы	96
6.4 Определение рентабельности продукции	97
6.5 Расчет прибыли, определение критического объема производства	97
6.6 Экономия электроэнергии в результате применения двигателей с более высоким КПД	99
7 Социальная ответственность	101
7.1 Анализ опасных и вредных факторов	101
7.2 Техника безопасности	104
7.3 Производственная санитария	105
7.4 Расчет искусственного освещения	106
7.5 Выбор источников света	106
7.6 Выбор системы освещения	107
7.7 Выбор осветительных приборов	107
7.8 Выбор коэффициента запаса	108
7.9 Размещение осветительных приборов	108
7.10 Расчёт осветительной установки	110
7.11 Микроклимат	111
7.12 Пожарная безопасность	112
7.13 Содержание зданий и помещений	113
7.14 На территории и в помещениях запрещается	114
7.15 Каждый работающий на предприятии должен знать	115
7.16 Охрана окружающей среды	117
Заключение	120
Список используемых источников	123
Приложение А Рабочие характеристики двигателя	125
Приложение Б Пусковые характеристики двигателя	126
Приложение В Эскиз паза ротора в штампе	127
Приложение Г Эскиз паза статора в штампе с заполнением	128
Приложение Д Схема обмотки	129
Маршрутная карта	
Графические материалы:	
ФЮРА.018.000.001 Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором. Сборочный чертёж	
ФЮРА.018.000.002 Деталировка	
ФЮРА.018.000.003 Электромагнитный расчет: схема обмотки статора, характеристики	

# 1. Электромагнитный расчёт

## 1.1 Выбор главных размеров

Расчёт асинхронного двигателя специального исполнения будем проводить согласно методике [1], за исключением того, что электромагнитные загрузки будем принимать заниженными от рекомендуемых. Делать это будем с целью повышения устойчивости данного двигателя к колебаниям внешней температуры и питающего напряжения.

Высота оси вращения (предварительно) по [1, стр. 343]

$$h = 200 \text{ мм} \quad (1)$$

Тогда наружный диаметр статора по [1, стр. 343] для АД серии 4АИР при  $h = 0.2$  м выбирается по [1, стр. 344]:

$$D_a = 0.349 \text{ м} \quad (2)$$

Внутренний диаметр статора рассчитывается по [1, стр. 344]

$$D = K_D \cdot D_a = 0.650 \cdot 0.349 = 0.227 \text{ м} \quad (3)$$

где  $K_D$  - коэффициент выбирается по [1, стр. 344]

$$\text{Тогда } D = 0.227 \text{ м} \quad (4)$$

Полюсное деление определяется по [1, стр. 344]

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{3.14 \cdot 0.227}{4} = 0.178 \text{ м} \quad (5)$$

Расчётная мощность находится по [1, стр. 344]

$$P_1 = \frac{P_2 \cdot K_E}{\eta \cdot \cos\phi} = \frac{3.7 \cdot 10^4 \cdot 0.979}{0.91 \cdot 0.90} = 4.423 \cdot 10^4 \quad (6)$$

где  $K_E$  - отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению, определяется по [1, стр. 345]  $K_E = 0.979$ ;

$\eta$  - предварительное значение КПД, определяется по [1, стр. 345]  $\eta = 0.91$ ;

$\cos\phi$  - предварительное значение коэффициента мощности, определяется по [1, стр. 345]  $\cos\phi = 0.90$ ;

Тогда  $P_1 = 4.423 \cdot 10^4$

Электромагнитные нагрузки (предварительно) определяются по [1, стр. 346]

$$B_{\delta} = 0.76 \text{ Тл}$$

$$A = 35 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

Обмоточный коэффициент по [1, стр. 111]:

Предварительно относительный шаг по обмотке бэтта:

Обмотка с укорочением шага, принимаем 7/9 (т.е. должен легко без дробной

части считаться шаг обмотки  $y = \frac{Z_1}{2 \cdot p} \cdot \beta = \frac{36}{4} \cdot 0.778 = 7.002$ , полюсное

деление в пазовых делениях  $\tau = \frac{Z_1}{2 \cdot p} = \frac{36}{4} = 9$ ).

$$\beta = \frac{y}{\tau} = \frac{7}{9} = 0.778 \quad (10)$$

Число пазов на полюс и фазу из следующих расчётов  $q = 3$

$$K_{o61} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m_1 \cdot q}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{3.14}{2 \cdot 3}\right) \cdot \sin\left(\frac{3.14}{2} \cdot 0.778\right)}{3 \cdot \sin\left(\frac{3.14}{2 \cdot 3 \cdot 3}\right)} = 0.902 \quad (11)$$

Расчетная длина магнитопровода определяется по [1, стр. 348]

$$l_{\delta} = \frac{P_1}{k_g \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot K_{o61} \cdot A \cdot B_{\delta}} = \frac{4.423 \cdot 10^4}{1.11 \cdot 0.227^2 \cdot 157.08 \cdot 0.902 \cdot 3.5 \cdot 10^4 \cdot 0.76} = 0.205 \quad (12)$$

где  $k_g$  - коэффициент формы поля, предварительно принимается равным по [1, стр. 348]

$$k_g = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1.11 \quad (13)$$

$\Omega$  - синхронная угловая частота двигателя, рассчитывается по [1, стр. 348]

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_1}{p} = \frac{2 \cdot 3.14 \cdot 50}{2} = 157.08 \text{ рад/с} \quad (14)$$

Тогда  $l_{\delta} = 0.205 \text{ м}$

$$\text{Отношение } \lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau} = \frac{0.205}{0.178} = 1.153 \quad (15)$$

Значение  $\lambda = 1.153$  входит в предлагаемые пределы [1, стр. 348].

## 1.2 Расчёт обмотки статора

При расчете обмотки статора определяется число пазов статора, число витков в фазе обмотки и сечение проводника. При этом число витков фазы обмотки статора должно соответствовать линейной нагрузке и индукции в воздушном зазоре так, чтобы они как можно ближе совпадали с предварительно выбранными значениями, а число пазов статора обеспечивало достаточно равномерное распределение катушек обмотки. Известно, что для более равномерного распределения катушек обмотки по длине окружности зазора необходимо большое число пазов, но при этом необходимо проследить за механической прочностью зубцов.

Предельные значения зубцового деления  $t_{z1}$  выбираются по [1, стр. 351]

при  $\tau = 0.178$

$$t_{Z1\min} = 0.016 \text{ м}, t_{Z1\max} = 0.020 \text{ м} \quad (16)$$

Возможное число пазов статора определяется по [1, стр. 351]

$$Z_{1\min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1\max}} = \frac{3.14 \cdot 0.227}{0.020} = 35.63 \quad (17)$$

$$Z_{1\max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1\min}} = \frac{3.14 \cdot 0.227}{0.016} = 44.54 \quad (18)$$

Окончательно число пазов статора выбирается равным  $Z_1 = 36$

Тогда условие  $q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m_1} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3$  выполняется.

Окончательное значение зубцового деления статора определяется по [1, стр. 457]

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m_1 \cdot q} = \frac{3.14 \cdot 0.227}{4 \cdot 3 \cdot 3} = 0.0198 \text{ м} \quad (19)$$

Предварительное число эффективных проводников в пазу определяется по [1, стр. 352]

$$u_{n1} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_1 \cdot Z_1} = \frac{3.14 \cdot 0.227 \cdot 3.5 \cdot 10^4}{68.45 \cdot 36} = 10.122 \quad (20)$$

где  $I_1$  - номинальный ток обмотки статора, определяется по [1, стр. 352]

$$I_1 = \frac{P_2}{m_1 \cdot U_1 \cdot \eta \cdot \cos\phi} = \frac{3.7 \cdot 10^4}{3 \cdot 220 \cdot 0.91 \cdot 0.90} = 68.45 \quad (21)$$

Тогда  $u_{n1} = 10.122$

Число паралельных ветвей принимается равным  $a = 1$

тогда окончательное значение числа проводников в пазу определяется по [1, стр. 352]

$$u_{n1} = a \cdot u_{n1} \quad u_{n1} = 10.12 \quad (22)$$

Округляем до целого числа и принимаем  $u_{n1} = 10$

Окончательные значения: число витков в фазе по [1, стр. 352]

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m_1} = \frac{10 \cdot 36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 60 \quad (23)$$

$$w_1 = 60$$

линейная нагрузка по [1, стр. 353]

$$A = \frac{2 \cdot I_1 \cdot w_1 \cdot m_1}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 68.45 \cdot 60 \cdot 3}{3.14 \cdot 0.227} = 3.458 \cdot 10^4 \text{ А/м} \quad (24)$$

магнитный поток по [1, стр. 353]

$$\Phi = \frac{K_E \cdot U_1}{4 \cdot k_e \cdot w_1 \cdot K_{об1} \cdot f_1} = \frac{0.979 \cdot 220}{4 \cdot 1.11 \cdot 60 \cdot 0.902 \cdot 50} = 0.018 \text{ Вб} \quad (25)$$

индукция в воздушном зазоре по [1, стр. 353]

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot p}{D \cdot l_\delta} = \frac{0.018 \cdot 2}{0.227 \cdot 0.205} = 0.769 \text{ Тл} \quad (26)$$

$$B_\delta = 0.769 \text{ Тл}$$

Значения  $A$  и  $B_\delta$  находятся в допустимых пределах [1, стр. 346].

Плотность тока в обмотке статора с учетом линейной нагрузки (предварительно) по [1, стр. 354]

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{1.88 \cdot 10^{11}}{3.458 \cdot 10^4} \text{ A/м}^2 \quad (27)$$

где  $AJ$  - произведение линейной нагрузки на плотность тока, выбирается по [1, стр. 355]

$$\text{Тогда } J_1 = 5.44 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2$$

Предварительно площадь поперечного сечения эффективного проводника определяется по [1, стр. 353]

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_1}{a \cdot J_1} = \frac{68.45}{1.5.437 \cdot 10^6} = 1.259 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 \quad (28)$$

Сечение эффективного проводника (окончательно) при условии, что принятое число элементарных проводников  $n_{\text{эф}} = 6$ , определяется по [1, стр. 354]

$$q_{\text{эф}} = \frac{q_{\text{эл}}}{n_{\text{эл}}} = \frac{1.259 \cdot 10^{-5}}{6} = 2.098 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 \quad (29)$$

Принимается обмоточный провод марки ПЭТ-155 по [1, стр. 713]

$$q_{\text{эл}} = 2.27 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, d_{\text{из}} = 1.785 \cdot 10^{-3} \text{ м}, d_{\text{эл}} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$q_{\text{эф}} = q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}$$

$$q_{\text{эф}} = 1.362 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Плотность тока в обмотке статора (окончательно) определяется по [1, стр. 354]

$$J_1 = \frac{I_1}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = \frac{68.45}{1 \cdot 2.27 \cdot 10^{-6} \cdot 6} = 5.026 \cdot 10^6 \quad (30)$$

$$J_1 = 5.026 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2$$

### 1.3 Расчёт размеров зубцовой зоны статора

При выборе размеров пазов необходимо учесть ряд моментов. Во-первых, необходимо чтобы площадь паза соответствовала количеству и размерам размещаемым в нем проводников обмотки с учетом всей изоляции, а во-вторых, необходимо чтобы значения индукции в зубцах и ярме статора находились в определенных пределах, зависящих от типа машины, ее мощности, исполнения и от марки электротехнической стали сердечника.

Так как обмоточный провод имеет круглое сечение, то он может быть уложен в пазы произвольной конфигурации, поэтому размеры зубцовой зоны при насыщенной обмотке выбираются 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 трапециевидальных зубцов при том же среднем значении индукции в них.

Выбирается трапециевидальный вид паза статора по [1, стр. 361]

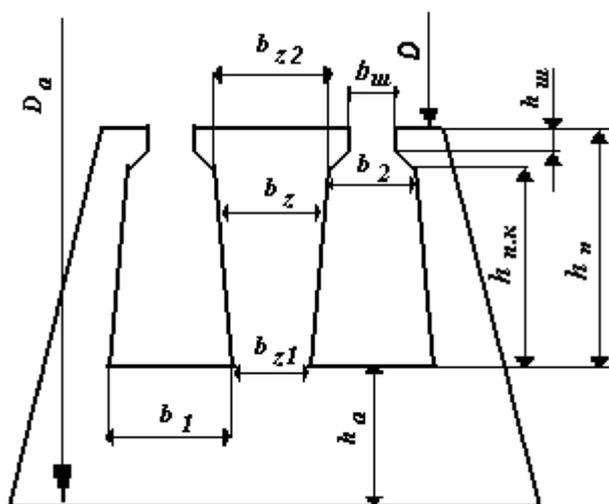


Рисунок 1.1 Вид пазов статора

Предварительно принимаются значения индукции в следующих частях статора по [1, стр. 357]:

Ярмо статора  $B_a = 1.4$  Тл

Зубцы статора при постоянном сечении  $B_{z1} = 1.7$  Тл

Тогда размещение пазов будут определяться по формулам [1, стр. 362]

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{B_{z1} \cdot K_c} = \frac{0.769 \cdot 0.02}{1.7 \cdot 0.97} = 9.235 \cdot 10^{-3} \quad (31)$$

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot l_{\delta} \cdot K_c} = \frac{0.018}{2 \cdot 1.4 \cdot 0.205 \cdot 0.97} = 0.0321 \text{ м} \quad (32)$$

где  $K_c$  - коэффициент заполнения сталью магнитопровода, по [1, стр. 358]

$$K_c = 0.97,$$

$$h_a = 0.0321 \text{ м},$$

$$b_{z1} = 9.235 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Размеры паза в штампе определяются по формулам [1, стр. 362, 365]

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0.349 \cdot 0.227}{2} - 0.0321 = 0.029 \text{ м} \quad (33)$$

$$b_1 = \left[ \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot h_n)}{Z_1} \right] - b_{z1} = \left[ \frac{3.14 \cdot (0.227 + 2 \cdot 0.029)}{36} \right] - 9.235 \cdot 10^{-3} = 0.016 \text{ м} \quad (34)$$

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

$$= \frac{3.14 \cdot (0.227 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 7 \cdot 10^{-3}) - 36 \cdot 9.235 \cdot 10^{-3}}{36 - 3.14} = 0.011 \quad (35)$$

$$h_k = \frac{b_2 \cdot b_{uu}}{2} = \frac{0.011 \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}}{2} = 3.854 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (36)$$

$$h_{n.k} = h_n - (h_{uu} + h_k) = 0.029 - (1 \cdot 10^{-3} + 3.854 \cdot 10^{-3}) = 0.024 \text{ м} \quad (37)$$

Размеры шлица полузакрытых пазов  $h_{uu}$  и  $b_{uu}$  определяются по [1, стр. 363]

$$h_{uu} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_{uu} = 3.7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Тогда

$$h_n = 0.029 \text{ м}$$

$$b_1 = 0.016 \text{ м}$$

$$b_2 = 0.011 \text{ м}$$

$$h_k = 3.854 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$h_{n.k} = 0.024 \text{ м}$$

Припуск по высоте и ширине паза определяется по [1, стр. 360]

$$\Delta b_n = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$\Delta h_n = 0.2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Размеры паза в свету с учётом припуска на сборку рассчитываются по формулам [1, стр. 363]:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_n = 0.016 - 0.2 \cdot 10^{-3} = 0.0154 \text{ м}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_n = 0.011 - 0.2 \cdot 10^{-3} = 0.0112 \text{ м}$$

$$h'_{n.k} = h_{n.k} - \Delta h_n = 0.024 - 0.2 \cdot 10^{-3} = 0.024 \text{ м}$$

Площадь поперечного сечения корпусной изоляции в пазу подсчитаем по [1, стр. 365]

$$S_{uz} = b_{uz} \cdot (2 \cdot h_n + b_1 + b_2) = 4 \cdot 10^{-4} \cdot (2 \cdot 0.029 + 0.016 + 0.011) = 3.397 \cdot 10^{-5} \quad (38)$$

где  $b_{uz}$  - односторонняя толщина изоляции в пазу, определяется по [1, стр. 77]

$$b_{uz} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Тогда

$$S_{uz} = 3.397 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Площадь занимаемая прокладкой

$$S_{np} = (0.9 \cdot b_1 + 0.4 \cdot b_2) \cdot 10^{-3} = (0.9 \cdot 0.016 + 0.4 \cdot 0.011) \cdot 10^{-3} = 1.862 \cdot 10^{-5} \quad (39)$$

Площадь поперечного сечения, оставшаяся для размещения проводников в обмотке определяется по [1, стр. 365]

$$S_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_{n.k} - S_{uz} - S_{np} =$$

$$= \frac{0.0154 + 0.0112}{2} \cdot 0.024 - 3.397 \cdot 10^{-5} - 1.862 \cdot 10^{-5} = 2.655 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (40)$$

Коэффициент заполнения паза статора проводом определяется по [1, стр. 366]

$$k_3 = \frac{d_{uz}^2 \cdot n_{эл} \cdot u_n}{S_n} = \frac{1.785 \cdot 10^{-32} \cdot 6 \cdot 10}{2.655 \cdot 10^{-4}} = 0.72 \quad (41)$$

Для двигателей с  $2 \cdot p = 4$  коэффициент заполнения паза должен входить в область допустимых пределов  $k_3 = 0.72 - 0.74$  по [1, стр. 366], т.к.  $k_3 = 0.72$  следовательно расчет удовлетворяет требованиям.

#### 1.4 Расчёт ротора

Воздушный зазор определяется по [1, стр. 367] для двигателей средней и большой мощности:

$$\delta = \frac{D}{1.2} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 \cdot p}\right) \cdot 10^{-3} = \frac{0.227}{1.2} \cdot \left(1 + \frac{9}{4}\right) \cdot 10^{-3} = 6.144 \cdot 10^{-4} \quad (42)$$

Число пазов ротора определяется по [1, стр. 374].

Выбирается значение  $Z_2$

$$Z_2 = 36$$

Внешний диаметр ротора определяется по следующей формуле

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0.227 - 2 \cdot 6.144 \cdot 10^{-4} = 0.2256 \text{ м} \quad (43)$$

Длина магнитопровода ротора принимается равной длине статора

$$l_2 = l_s$$

$$l_2 = 0.205 \text{ м}$$

Зубцовое деление ротора

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{3.14 \cdot 0.2256}{26} = 0.0273 \text{ м} \quad (44)$$

Внутренний диаметр ротора равен диаметру вала, так как сердечник непосредственно насажен на вал и может быть определён по [1, стр. 385].

$$D_g = k_g \cdot D_a = 0.23 \cdot 0.349 = 0.08 \text{ м} \quad (45)$$

где  $k_g$  - коэффициент, определяется по [1, стр. 385].

Тогда

$$D_g = 0.08 \text{ м}$$

Ток в обмотке ротора определяется по [1, стр. 370]

$$I_2 = k_i \cdot v_i \cdot I_1 = 0.92 \cdot 12.49 \cdot 68.45 = 786.421 \text{ А} \quad (46)$$

где  $k_i$  - коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания, определяется по [1, стр. 370]

$$k_i = 0.2 + 0.8 \cdot \cos\phi = 0.2 + 0.8 \cdot 0.9 = 0.92 \quad (47)$$

$v_i$  - коэффициент приведения токов, определяется по [1, стр. 374]

$$v_i = \frac{2 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot K_{о\phi 1}}{Z_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 0.902}{26} = 12.49 \quad (48)$$

Тогда

$$I_2 = 786.421 \text{ А}$$

Площадь поперечного сечения стержня определяется по [1, стр. 375]

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{786.421}{3.5 \cdot 10^6} = 2.247 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (49)$$

где  $q_c$  - плотность тока в стержнях литой клетки, принимается по [1, стр. 375]

$$J_2 = 3.5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Тогда

$$q_c = 2.247 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Выбираются грушевидные полузакрытые пазы ротора по [1, стр. 380]

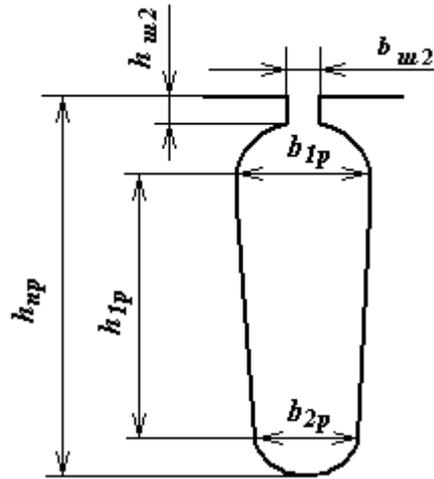


Рисунок 1.2 Вид пазов ротора

Предварительно принимаются значения индукции в следующих частях ротора по [1, стр. 357]:

Зубцы ротора при постоянном сечении  $B_{z2} = 1.7$  Тл

Тогда размещение пазов будут определяться по формулам [1, стр. 362]

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2}}{B_{z2} \cdot K_c} = \frac{0.769 \cdot 0.027}{1.7 \cdot 0.97} = 0.013 \text{ м} \quad (50)$$

Размеры паза определяются по формулам [1, стр. 381, 382]

$$b_{1p} = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{w2}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} =$$

$$= \frac{3.14 \cdot (0.226 - 2 \cdot 7.5 \cdot 10^{-4}) - 26 \cdot 0.013}{3.14 \cdot 26} = 0.013 \text{ м} \quad (51)$$

$$b_{2p} = \sqrt{\frac{b_{1p} \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 4 \cdot q_c}{\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}}} =$$

$$\sqrt{\frac{0.013^2 \cdot \left(\frac{26}{3.14} + \frac{3.14}{2}\right) - 4 \cdot 2.247 \cdot 10^{-4}}{\frac{26}{3.14} + \frac{3.14}{2}}} = 8.54 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (52)$$

$$h_{1p} = (b_{1p} - b_{2p}) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (0.013 - 8.54 \cdot 10^{-3}) \cdot \frac{26}{2 \cdot 3.14} = 0.018 \text{ м} \quad (53)$$

$$h_{np} = h_{u2} + \frac{b_{1p}}{2} + h_{1p} + \frac{b_{2p}}{2} = 7.5 \cdot 10^{-4} + \frac{0.013}{2} + 0.018 \frac{8.54 \cdot 10^{-3}}{2} = 0.029 \text{ м} \quad (54)$$

Площадь поперечного сечения стержня определяются по [1, стр. 380]

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_{1p}^2 + b_{2p}^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_{1p} + b_{2p}) \cdot h_{1p} =$$

$$= \frac{3.14}{8} \cdot (0.013^2 + (8.54 \cdot 10^{-3})^2) + \frac{1}{2} \cdot (0.013 + 8.54 \cdot 10^{-3}) \cdot 0.018 = 2.82 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (55)$$

Плотность тока в стержне (окончательно) определяется следующим образом

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{786.421}{2.82 \cdot 10^{-4}} = 2.789 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (56)$$

Выбираются короткозамкнутые кольца с литой обмоткой по [1, стр. 376]

Токи в кольце определяются по [1, стр. 376]

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = \frac{786.421}{0.479} = 1.64 \cdot 10^3 \text{ А} \quad (57)$$

где  $\Delta$  - определяется по [1,стр.376]

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) = 2 \cdot \sin\left(\frac{3.14 \cdot 2}{26}\right) = 0.479 \quad (58)$$

Плотность тока в замыкающих кольцах принимается равной на 15-20% меньше, чем в стержнях [1, стр. 376]

$$J_{кл} = 0.85 \cdot J_2 = 0.85 \cdot 2.789 \cdot 10^6 = 2.371 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 \quad (59)$$

$$J_{кл} = 2.371 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Площадь поперечного сечения короткозамкнутых колец находится по [1, стр. 376]

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{1.643 \cdot 10^3}{2.371 \cdot 10^6} = 6.931 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (60)$$

Размеры замыкающих колец определяются из выражений по [1, стр. 377]

$$b_{кл} = 1.25 \cdot h_{np} = 1.25 \cdot 0.029 = 0.036 \text{ м} \quad (61)$$

$$h_{кл} = \frac{q_{кл}}{b_{кл}} = \frac{6.931 \cdot 10^{-4}}{0.036} = 0.019 \text{ м} \quad (62)$$

$$D_{ксп} = D_2 - b_{кл} = 0.226 - 0.036 = 0.189 \text{ м} \quad (63)$$

### 1.5 Расчёт магнитной цепи

Расчет намагничивающего тока проводится для режима холостого хода.

Выбираем сталь из номенклатуры по [1, стр. 692-706]. Выбирается магнитопровод из стали 2212; толщина листов 0,5 мм. Далее для каждого участка магнитной цепи задаётся напряжённость  $H$  в зависимости от индукции  $B$  на этом участке, по таблице для выбранной стали по [1, стр. 692-706].

В связи с тем, что поверхности статора и ротора ограничивающие воздушный зазор, не гладкие, а имеют различные неравномерности: пазы, углубления для размещения бандажей и другие, магнитное сопротивление участков такого зазора в поперечном сечении машины различно, поэтому распределение индукции по площади такого воздушного зазора неравномерно. Наибольшая неравномерность возникает из-за наличия зубцов на статоре и роторе. Над коронками зубцов магнитные линии потока сгущаются, а над прорезями пазов плотность линии уменьшается. В кривой индукции в воздушном зазоре появляются провалы. Магнитное сопротивление и магнитное напряжение воздушного зазора при неравномерной индукции возрастают.

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

Магнитное напряжение воздушного зазора определяется по [1, стр. 386]

$$F_{\delta} = 1.59 \cdot 10^6 \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \quad (64)$$

где  $k_{\delta}$  - коэффициент воздушного зазора, определяется по [1, стр. 174]

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0.02}{0.02 - 3.29 \cdot 6.144 \cdot 10^{-4}} = 836.976 \text{ A} \quad (65)$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_u}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_u}{\delta}} = \frac{\left(\frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{6.144 \cdot 10^{-4}}\right)^2}{5 + \frac{3.7 \cdot 10^{-3}}{6.144 \cdot 10^{-4}}} = 3.29 \quad (66)$$

Тогда

$$k_{\delta} = 1.114$$

$$F_{\delta} = 836.976 \text{ A}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора определяется по [1, стр. 387]

$$h_{z2} = h_{np} - 0.1 \cdot b_2 = 0.029 - 0.1 \cdot 0.011 = 0.028 \text{ A} \quad (67)$$

где  $h_{z1} = h_n$ ,  $h_{z1} = 0.029 \text{ м}$

$H_{z1}$  - расчетная напряженность поля в зубцах, определяется по [1, стр. 698]

из расчета индукции в зубце, которая в свою очередь определяется по [1, стр. 387]

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z1}}{b_{z1} \cdot K_c} = \frac{0.769 \cdot 0.02}{9.235 \cdot 10^{-3} \cdot 0.97} = 1.7 \text{ Тл} \quad (68)$$

$$H_{z1} = 1900 \text{ A/м}$$

Тогда

$$F_{z1} = 110.002 \text{ A}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора определяется по [1, стр. 387]

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0.028 \cdot 1900 = 106.3 \text{ A} \quad (69)$$

$$h_{z2} = h_{np} - 0.1 \cdot b_2 = 0.029 - 0.1 \cdot 0.011 = 0.028 \quad (70)$$

$H_{z1}$  - расчетная напряженность поля в зубцах, определяется по [1, стр. 698]

из расчета индукции в зубце, которая в свою очередь определяется по [1, стр. 387]

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{z2}}{b_{z2} \cdot K_c} = \frac{0.769 \cdot 0.027}{0.013 \cdot 0.97} = 1.7 \quad (71)$$

$$H_{z2} = 1900 \text{ А/м}$$

Тогда

$$F_{z2} = 106.3 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны определяется по [1, стр. 391]

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{110.002 + 106.3}{836.976} = 1.26 \quad (72)$$

Магнитное напряжение ярма статора рассчитывается по [1, стр. 394]

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0.249 \cdot 656 = 163.26 \text{ А} \quad (73)$$

где  $L_a$  - длина средней магнитной линии ярма статора рассчитывается по [1, стр. 394]

$$L_a = \pi \cdot \frac{(D_a - h_a)}{2 \cdot p} = 3.14 \cdot \frac{(0.349 - 0.032)}{4} = 0.249 \text{ м} \quad (74)$$

$H_a$  - напряженность поля определяется по [1, стр. 697] при индукции в ярме статора  $B_a$ , которая определяется по [1, стр. 394]

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot l_{\delta} \cdot K_c} = \frac{0.018}{2 \cdot 0.032 \cdot 0.205 \cdot 0.97} = 1.4 \text{ Тл} \quad (75)$$

$$H_a = 656 \text{ А/м}$$

Тогда

$$F_a = 163.26 \text{ А}$$

Магнитное напряжение ярма ротора рассчитывается по [1, стр. 395]

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0.097 \cdot 216 = 21.007 \text{ А} \quad (76)$$

Длина средней магнитной линии потока в ярме ротора определяется по [1, стр. 395]

$$L_j = \frac{(D_e + h_j) \cdot \pi}{2 \cdot p} = \frac{(0.08 + 0.044) \cdot 3.14}{4} = 0.097 \text{ м} \quad (77)$$

где  $h_j$  - высота ярма ротора, определяется по [1, стр. 395]

$$h_j = \frac{D_2 - D_6}{2} - h_{np} = \frac{0.226 - 0.08}{2} - 0.02 = 0.044 \text{ м} \quad (78)$$

Тогда

$$L_j = 0.097 \text{ м}$$

Напряженность поля  $H_j$  при индукции  $B_j$  для стали 2212 по [1, стр. 697].

Индукция определяется по [1, стр. 395]

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h'_j \cdot l_\delta \cdot K_c} = \frac{0.018}{2 \cdot 0.052 \cdot 0.205 \cdot 0.97} = 0.86 \text{ Тл} \quad (79)$$

где  $h'_j$  - расчетная высота ярма ротора, определяется по [1, стр. 395]

$$h'_j = \left( \frac{D_2}{2} - h_{np} \right) \cdot \frac{2+p}{3.2 \cdot p} = \left( \frac{0.226}{2} - 0.029 \right) \cdot \frac{2+2}{3.2 \cdot 2} = 0.052 \text{ м} \quad (80)$$

Тогда

$$B_j = 0.86 \text{ Тл}$$

$$H_j = 216 \text{ А/м}$$

$$F_j = 21.007 \text{ А}$$

Магнитное напряжение на пару полюсов рассчитывается по [1, стр. 396]

$$\begin{aligned} F_u &= F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = \\ &= 836.976 + 110.002 + 106.3 + 163.26 + 21.007 = 1237.5 \text{ А} \end{aligned} \quad (81)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи рассчитывается по [1, стр. 396]

$$k_\mu = \frac{F_u}{F_\delta} = \frac{1237.5}{836.976} = 1.48 \quad (82)$$

Намагничивающий ток рассчитывается по [1, стр. 396]

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_u}{0.9 \cdot m_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1}} = \frac{2 \cdot 1237.5}{0.9 \cdot 3 \cdot 60 \cdot 0.902} = 16.94 \text{ А} \quad (83)$$

Относительное значение намагничивающего тока по [1, стр. 396]

$$I'_\mu = \frac{I_\mu}{I_1} = \frac{16.94}{68.45} = 0.25 \quad (84)$$

Относительное значение должно входить в обозначенные для него пределы  $0.2 < I_\mu < 0.4$ , согласно [1, стр. 396].

## 1.6 Параметры рабочего режима

Активное сопротивление обмотки статора определяется по [1, стр. 397]

$$r_1 = K_R \cdot \rho_{115c} \cdot \frac{L_1}{q_{\text{эф}} \cdot a} = 1 \cdot 2.439 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{51.43}{1.362 \cdot 10^{-5} \cdot 1} = 0.092 \text{ Ом} \quad (85)$$

Коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока, но т.к. он в асинхронных двигателях проявляется незначительно по [1, стр. 398] принимается

$$K_R = 1$$

Длина проводников фазы обмотки находится по [1, стр. 397]

$$L_1 = l_{cp} \cdot w_1 = 0.857 \cdot 60 = 51.43 \text{ м} \quad (86)$$

Средняя длина катушки определяется по [1, стр. 398]

$$l_{cp} = 2 \cdot (l_n + l_l) = 2 \cdot (0.205 + 0.223) = 0.857 \text{ м} \quad (87)$$

где  $l_n$  - длина пазовой части, приравнивается конструктивной длине сердечника машины

$$l_n = l_\delta, l_n = 0.205 \text{ м}$$

$l_l$  - длина лобовой части всыпной обмотки находится по [1, стр. 398]

$$l_l = K_l \cdot b_{км} + 2 \cdot B = 1.3 \cdot 0.156 + 2 \cdot 0.01 = 0.223 \text{ м} \quad (88)$$

Для определения длины лобовой части необходимо определить следующие параметры: коэффициент  $K_l$  определяется по [1, стр. 399]

$$K_l = 1.3$$

средняя ширина катушки  $b_{км}$  определяется по [1, стр. 399]

$$b_{км} = \pi \cdot \frac{(D + h_n)}{2 \cdot p} = 3.14 \cdot \frac{(0.227 + 0.029)}{4} = 0.156 \text{ м} \quad (89)$$

длина вылета прямолинейной части катушек, для всыпной обмотки, выбирается равной по [1, стр. 399]

$$B = 0.01 \text{ м}$$

Тогда

$$l_n = 0.223 \text{ м}$$

$$l_{cp} = 0.857 \text{ м}$$

$$L_1 = 51.43 \text{ м}$$

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура 115°C; для меди удельное сопротивление равно по [1, стр. 463]

$$\rho_{115c} = \frac{10^{-6}}{41} = 2.439 \cdot 10^{-8} \text{ Ом/м} \quad (90)$$

Тогда активное сопротивление обмотки статора

$$r_1 = 0.092 \text{ Ом}$$

Длина вылета лобовой части катушки определяется по [1, стр. 399]

$$l_{\text{выл}} = K_{\text{выл}} \cdot b_{\text{кт}} + B = 0.4 \cdot 0.156 + 0.01 = 0.073 \text{ м} \quad (91)$$

где  $K_{\text{выл}}$  - коэффициент, определяется по [1, стр. 399]

Тогда

$$l_{\text{выл}} = 0.073 \text{ м}$$

Относительное значение активного сопротивления обмотки статора определяется по [1, стр. 411]

$$r'_1 = r_1 \cdot \frac{I_1}{U_1} = 0.092 \cdot \frac{68.45}{220} = 0.029 \quad (92)$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора определяется по [1, стр. 406]

$$r_2 = r_c + 2 \cdot \frac{r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 3.555 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot \frac{1.609 \cdot 10^{-6}}{0.479^2} = 4.959 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \quad (93)$$

Сопротивление стержня определяется по [1, стр. 406]

$$r_c = \rho_{115p} \cdot \frac{l_\delta}{q_c} = 4.878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{0.205}{2.82 \cdot 10^{-4}} = 3.555 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \quad (94)$$

где  $\rho_{115p}$  - удельное сопротивление алюминиевой обмотки ротора, при температуре 115°C по [1, стр. 463]

$$\rho_{115p} = 4.878 \cdot 10^{-8} \text{ Ом/м}$$

Тогда

$$r_c = 3.555 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключенного между двумя соседними стержнями определяется по [1, стр. 406]

$$r_{кл} = \rho_{115p} \cdot \frac{\pi \cdot D_{кл.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = 4.878 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{3.14 \cdot 0.189}{26 \cdot 6.931 \cdot 10^{-4}} = 1.609 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \quad (95)$$

где  $D_{кл.ср}$  - средний диаметр замыкающих колец, вычисляется по [1, стр. 406]

$$D_{кл.ср} = D_2 - b_{кл} = 0.226 - 0.036 = 0.189 \text{ м} \quad (96)$$

Тогда

$$r_{кл} = 1.609 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора равно

$$r_2 = 4.959 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Для дальнейших расчётов сопротивление  $r_2$  приводится к числу витков первичной обмотки по [1, стр. 406]

$$r'_2 = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2} = 4.959 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0.902)^2}{26} = 0.067 \text{ Ом} \quad (97)$$

Относительное значение определяется по [1, стр. 411]

$$r'_{2.} = r'_2 \cdot \frac{I_1}{U_1} = 0.067 \cdot \frac{68.45}{220} = 0.021 \quad (98)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора определяется по [1, стр. 402]

$$\begin{aligned} x_1 &= \left[ 15.8 \cdot \left( \frac{f_1}{100} \right) \cdot \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \right] \cdot \frac{l_\delta}{p \cdot q} \cdot (\lambda_n + \lambda_l + \lambda_o) = \\ &= \left[ 15.8 \cdot \left( \frac{50}{100} \right) \cdot \left( \frac{60}{100} \right)^2 \right] \cdot \frac{0.205}{2 \cdot 3} \cdot (1.354 \cdot 0.667 \cdot 2.609) = 0.451 \text{ Ом} \end{aligned} \quad (99)$$

Входящие коэффициенты магнитной проводимости  $\lambda_n$ ,  $\lambda_l$ ,  $\lambda_d$  обмоток определяют следующим образом. Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния определяется по [1, стр. 403]

$$\begin{aligned}\lambda_n &= \frac{h_{nk}}{3 \cdot b_2} \cdot k_\beta + \left( \frac{3 \cdot h_k}{b_2 + 2 \cdot b_{uu}} + \frac{h_{uu}}{b_{uu}} \right) \cdot k'_\beta = \\ &= \frac{0.024}{3 \cdot 0.011} \cdot 0.875 + \left( \frac{3 \cdot 3.854 \cdot 10^{-3}}{0.011 + 2 \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{3.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot 0.833 = 1.354\end{aligned}\quad (100)$$

где  $k_\beta$  - коэффициент, зависящий от укорочения шага, принимается равным т.к. укорочение шага  $\beta = 0.778$

Тогда

$$\lambda_n = 1.354$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния определяется по [1, стр. 403]

$$\lambda_l = 0.34 \cdot \frac{q}{l_s} \cdot (l_l - 0.64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0.34 \cdot \frac{3}{0.205} \cdot (0.223 - 0.64 \cdot 0.778 \cdot 0.178) = 0.667\quad (101)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния определяется по [1, стр. 407]

$$\lambda_d = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0.02}{12 \cdot 6.144 \cdot 10^{-4} \cdot 1.114} \cdot 1.082\quad (102)$$

Значение коэффициента  $\xi$  определяется по [1, стр. 407]

$$\xi = 2 \cdot k'_{ck} \cdot k_\beta - \left( \frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 \cdot K_{об1}^2 \cdot (\beta_{ck}^2 + 1) = 2 \cdot 1.5 \cdot 0.875 - \left( \frac{0.027}{0.02} \right)^2 \cdot 0.902^2 \cdot 1 = 1.082\quad (103)$$

где  $\beta_{ck}$  - коэффициент, определяющий скос пазов, но т.к. скоса нет

$k'_{ck}$  - коэффициент, определяется по [1, стр. 405], исходя из отношения

$$\frac{t_{z2}}{t_{z1}} = 1.377 \text{ м}$$

$$\beta_{cr} = 0$$

$$k'_{ck} = 1.5$$

Тогда

$$\xi = 1.082$$

$$\lambda_o = 2.609$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора равно

$$x_1 = 0.451 \text{ Ом}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления определяется по [1, стр. 411]

$$x_1' = x_1 \cdot \left( \frac{I_1}{U_1} \right) = 0.451 \cdot \left( \frac{68.45}{220} \right) = 0.14 \quad (104)$$

Индуктивное сопротивление обмотки короткозамкнутого ротора определяется по [1, стр. 407]

$$\begin{aligned} x_2 &= (7.9 \cdot f_1 \cdot l_\delta \cdot 10^{-6}) \cdot (\lambda_{n2} + \lambda_{r2} + \lambda_{o2}) = \\ &= (7.9 \cdot 50 \cdot 0.205 \cdot 10^{-6}) \cdot (1.45 + 0.38 + 3.325) = 4.19 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \end{aligned} \quad (105)$$

Входящие коэффициенты магнитной проводимости  $\lambda_{n2}$ ,  $\lambda_{r2}$ ,  $\lambda_{o2}$  обмоток определяется следующим образом.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния определяется по [1, стр. 408]

$$\begin{aligned} \lambda_{n2} &= \left[ \frac{h_0}{3 \cdot b_{1p}} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_{1p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_{1p}} \right] + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} = \\ &= \left[ \frac{0.023}{3 \cdot 0.013} \cdot \left( 1 - \frac{3.14 \cdot 0.013^2}{8 \cdot 2.82 \cdot 10^{-4}} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.013} \right] + \frac{7.5 \cdot 10^{-4}}{1.5 \cdot 10^{-3}} = 1.45 \end{aligned} \quad (106)$$

где  $h_0$  - находится по следующим образом

$$h_0 = h_{1p} + \frac{b_{2p}}{2} + 0.1 \cdot b_{2p} = 0.018 + \frac{8.54 \cdot 10^{-3}}{2} + 0.1 \cdot 8.54 \cdot 10^{-3} = 0.023 \text{ м} \quad (107)$$

Тогда

$$\lambda_{n2} = 1.45$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния определяется по [1, стр. 409]

$$\begin{aligned} \lambda_{n2} &= \left( \frac{2.3 \cdot D_{\text{клер}}}{Z_2 \cdot l_{\delta} \cdot \Delta^2} \right) \cdot \log \left( \frac{4.7 \cdot D_{\text{клер}}}{2 \cdot h_{\text{кл}} + b_{\text{кл}}} \right) = \\ &= \left( \frac{2.3 \cdot 0.189}{26 \cdot 0.205 \cdot 0.479^2} \right) \cdot \log \left( \frac{4.7 \cdot 0.189}{2 \cdot 0.019 + 0.036} \right) = 0.38 \end{aligned} \quad (108)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния определяется по [1, стр. 409]

$$\lambda_{\partial 2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi_2 = \frac{0.027}{12 \cdot 6.144 \cdot 10^{-4} \cdot 1.114} \cdot 1.002 = 3.325 \quad (109)$$

Значение коэффициента  $\xi_2$  определяется по [1, стр. 409]

$$\xi_2 = \left[ 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 \right] - \frac{\Delta_z}{1 - \left( \frac{p}{Z_2} \right)^2} = \left[ 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{3.14 \cdot 2}{26} \right)^2 \right] - \frac{0.01}{1 - \left( \frac{2}{26} \right)^2} = 1.002 \quad (110)$$

где  $\Delta_z$  - находится по [1, стр. 405], исходя из отношений

$$\Delta_z = 0.01$$

Тогда

$$\xi_2 = 1.002$$

$$\lambda_{\partial 2} = 3.325$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора равно

$$x_2 = 4.19 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$$

Полученное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора приводится к числу витков обмотки статора по [1, стр. 409]

$$x'_2 = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m_1 \cdot (w_1 \cdot K_{\text{об1}})^2}{Z_2} = 4.19 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (60 \cdot 0.902)^2}{26} = 0.566 \text{ Ом} \quad (111)$$

Относительное значение индуктивное сопротивление определяется по [1, стр. 411]

$$x'_2 = x'_2 \cdot \frac{I_1}{U_1} = 0.566 \cdot \frac{68.45}{220} = 0.176 \quad (112)$$

### 1.7 Расчёт потерь

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

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

Основные потери в стали асинхронных двигателей рассчитываются только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная  $f_2 = f_1 \cdot s$  в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших индукциях незначительны.

Основные потери в стали определяются по [1, стр. 412]

$$P_{\text{стосн}} = \rho_{\frac{0}{50}} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot (B_a^2 \cdot m_a \cdot k_{\text{оа}} + k_{\text{оз}} \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}) =$$

$$= 2.2 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1.3} \cdot (1.4^2 \cdot 49.72 \cdot 1.6 + 1.8 \cdot 1.7^2 \cdot 14.96) = 514.24 \text{ Вт} \quad (113)$$

Удельные потери в стали А.Д.  $\rho$  и значение коэффициента  $\beta$  при толщине листов 0,5 мм выбираются по [1, стр. 412]

$$\rho_{\frac{0}{50}} = 2.2$$

$$\beta = 1.3$$

Коэффициенты  $k_{\partial a}$  и  $k_{\partial z}$  учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов принимаются по [1, стр. 412]

$$k_{\partial a} = 1.6$$

$$k_{\partial z} = 1.8$$

Масса стали ярма статора определяется по [1, стр. 412]

$$\begin{aligned} m_a &= \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_\delta \cdot K_c \cdot \gamma_c = \\ &= 3.14 \cdot (0.349 - 0.032) \cdot 0.032 \cdot 0.205 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 49.72 \text{ кг} \end{aligned} \quad (114)$$

где  $\gamma_c$  - удельная масса стали принимается равной

$$\gamma_c = 7.8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$$

Тогда

$$m_a = 49.72 \text{ кг}$$

Масса стали зубцов статора определяется по [1, стр. 412]

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot l_\delta \cdot K_c \cdot \gamma_c = \\ &= 0.029 \cdot 9.235 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0.205 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 14.96 \text{ кг} \end{aligned} \quad (115)$$

Основные потери в стали равны

$$P_{\text{стосн}} = 514.24 \text{ Вт}$$

Поверхностные потери в роторе определяются по [1, стр. 414]

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} \cdot (t_{Z2} \cdot b_{u2}) \cdot Z_2 \cdot l_\delta = 345.951 \cdot (0.027 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot 26 \cdot 0.205 = 47.61 \text{ Вт} \quad (116)$$

Потери приходящиеся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности головок зубцов определяются по [1, стр. 413]

$$\begin{aligned} p_{\text{пов2}} &= 0.5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n_c}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_{Z1} \cdot 10^3)^2 = \\ &= 0.5 \cdot 1.4 \cdot \left( \frac{36 \cdot 1.5 \cdot 10^3}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0.317 \cdot 0.02 \cdot 10^3)^2 = 345.951 \text{ Вт/м}^2 \end{aligned} \quad (117)$$

где  $k_{02}$  - коэффициент учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери, принимается по [1, стр. 413]

$$k_{02} = 1.4$$

$n_c$  - синхронная частота вращения двигателя, находится следующим образом

$$n_c = \frac{60 \cdot f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1.5 \cdot 10^3 \quad (118)$$

$B_{02}$  - амплитуда пульсации индукции в воздушном зазоре, определяется по [1, стр. 413]

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0.37 \cdot 1.114 \cdot 0.769 = 0.317 \quad (119)$$

$\beta_{02}$  - находится по [1, стр. 413], исходя из отношения  $\frac{b_{ш}}{\delta} = 6$

$$\beta_{02} = 0.37$$

$$B_{02} = 0.317$$

Тогда потери приходящиеся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности головок зубцов равны

$$P_{пов2} = 345.951 \text{ Вт/м}^2$$

а полные поверхностные потери в роторе

$$P_{пов2} = 47.61 \text{ Вт}$$

Пульсационные потери в роторе определяются по [1, стр. 414]

$$P_{пуль2} = 0.11 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n_c}{1000} \cdot B_{пуль2} \right)^2 \cdot m_{z2} =$$

$$0.11 \cdot \left( \frac{36 \cdot 1.5 \cdot 10^3}{1000} \cdot 0.063 \right)^2 \cdot 14.38 = 18.325 \text{ Вт} \quad (120)$$

где  $B_{пуль2}$  - амплитуда пульсаций в среднем сечении зубцов ротора, находится по [1, стр. 414]

$$B_{пуль2} = \frac{\gamma \cdot \delta}{2 \cdot t_{z2}} \cdot B_{z2} = \frac{3.29 \cdot 6.144 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 0.027} \cdot 1.7 = 0.063 \text{ Тл} \quad (121)$$

$m_{z2}$  - масса стали зубцов ротора, определяется по [1, стр. 414]

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Z_2 \cdot l_\delta \cdot K_c \cdot \gamma_c = 0.028 \cdot 0.013 \cdot 26 \cdot 0.205 \cdot 0.97 \cdot 7.8 \cdot 10^3 = 14.38 \text{ кг} \quad (122)$$

Тогда

$$P_{\text{нул}2} = 18.325 \text{ Вт}$$

Полные потери в стали определяется по [1, стр. 415]

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{стосн}} + P_{\text{стдоб}} = 514.237 + 65.935 = 580.172 \text{ Вт} \quad (123)$$

где  $P_{\text{стдоб}}$  - сумма добавочных потерь в стали, определяется по [1, стр. 415]

$$P_{\text{стдоб}} = P_{\text{нул}2} + P_{\text{нов}2} = 18.325 + 47.61 = 65.935 \text{ Вт} \quad (124)$$

Тогда

$$P_{\text{ст}} = 580.172 \text{ Вт}$$

Механические потери в двигателях с внешним обдуванием подсчитываются по [1, стр. 416]

$$P_{\text{мех}} = K_T \cdot \left( \frac{n_c}{1000} \right)^2 \cdot (10 \cdot D)^3 = 7 \cdot \left( \frac{1.5 \cdot 10^3}{1000} \right) \cdot (10 \cdot 0.227)^3 = 183.864 \text{ Вт} \quad (125)$$

где  $K_T$  - определяется по [1, стр. 416]

$$K_T = 7$$

Тогда

$$P_{\text{мех}} = 183.864 \text{ Вт}$$

Холостой ход двигателя ток Х.Х. двигателя определяется по [1, стр. 417]

$$I_{\text{хх}} = \sqrt{I_{\text{хха}}^2 + I_{\text{ххр}}^2} = \sqrt{1.278^2 + 16.94^2} = 16.988 \text{ А} \quad (126)$$

где  $I_{\text{хха}}$  - активная составляющая тока Х.Х., находится по [1, стр. 417]

$$I_{\text{хха}} = \left( \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{элхх}}}{m_1 \cdot U_1} \right) = \left( \frac{580.172 + 183.864 + 79.289}{3 \cdot 220} \right) = 1.278 \text{ А} \quad (127)$$

$P_{\text{элхх}}$  - электрические потери в статоре при Х.Х. приближённо принимаются равными по [1, стр. 417]

$$P_{\text{элхх}} = m_1 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 16.94^2 \cdot 0.092 = 79.289 \text{ Вт} \quad (128)$$

$$I_{\text{хха}} = 1.278 \text{ А}$$

$I_{\text{хха}}$  - реактивная составляющая тока Х.Х., принимается по [1, стр. 417]

$$I_{\text{ххр}} = I_{\mu}$$

$$I_{x\mu} = 16.94$$

Тогда

$$I_{xx} = 16.988 \text{ А}$$

Коэффициент мощности при Х.Х. определяется по [1, стр. 417]

$$\cos \varphi_{x.x.} = \frac{I_{xxa}}{I_{xx}} = \frac{1.278}{16.988} = 0.075 \quad (129)$$

### 1.8 Расчёт рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называются зависимости  $P_1$ ,  $I_1$ ,  $\cos \varphi$ ,  $\eta$ ,  $s = f(P_2)$ . Методы расчета характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения. Активные и индуктивные сопротивления схемы замещения являются параметрами машины.

Величина последовательно включенных сопротивлений определяется по [1, стр. 410]

$$r_{12} = \frac{P_{\text{стосн}}}{m_1 \cdot I_{\mu}^2} = \frac{514.237}{3 \cdot 16.94^2} = 0.597 \text{ Ом} \quad (130)$$

$$x_{12} = \frac{U_1}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{16.94} - 0.451 = 12.536 \text{ Ом} \quad (131)$$

Активная и реактивная составляющие коэффициента  $C_1$  определяется по [1, стр. 419]

$$C_{1a} = \frac{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{0.597 \cdot (0.092 + 0.597) + 12.536 \cdot (0.451 + 12.536)}{0.597^2 + 12.536^2} = 1.036 \quad (132)$$

$$C_{1p} = \frac{-x_1 \cdot r_{12} + r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = \frac{-0.451 \cdot 0.597 + 0.092 \cdot 12.536}{0.597^2 + 12.536^2} = 5.62 \cdot 10^{-3} \quad (133)$$

Тогда полное значение коэффициента  $c_1$  будет определяться следующим образом

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2} = \sqrt{1.036^2 + 5.62 \cdot 10^{-3}^2} = 1.036 \quad (134)$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода находится по [1, стр. 420]

$$I_{oa} = \frac{P_{стосн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{514.237 + 3 \cdot 16.94^2 \cdot 0.092}{3 \cdot 220} = 0.899 \text{ А} \quad (135)$$

Значения расчётных величин определяются исходя из [1, стр. 420]:

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2 = 1.036^2 - 5.62 \cdot 10^{-3} = 1.074 \quad (136)$$

$$b' = 2 \cdot c_{1a} \cdot c_{1p} = 2 \cdot 1.036 \cdot 5.62 \cdot 10^{-3} = 0.012 \quad (137)$$

$$a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' \cdot x_2 = 1.036 \cdot 0.092 - 5.62 \cdot 10^{-3} \cdot 0.451 - 0.012 \cdot 0.566 = 0.086 \quad (138)$$

$$b = c_{1a} \cdot x_1 + c_{1p} \cdot r_1 + a' \cdot x_2 = 1.036 \cdot 0.451 + 5.62 \cdot 10^{-3} \cdot 0.092 + 1.074 \cdot 0.566 = 1.076 \quad (139)$$

Потери, не меняющиеся при изменении скольжения, определяются следующим образом

$$P_{ст} + P_{мех} = 580.172 + 183.864 = 764.04 \text{ Вт} \quad (140)$$

Предварительно принимаем значение номинального скольжения равным:

$$s_H = r'_2$$

$$s_H = 0.021$$

Приведём подробный расчёт рабочих х-к для ряда рабочих точек:

Расчет представлен в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Расчет рабочих характеристик

Расчетные формулы	Ед.	Скольжение					
		0.0001	0.0003	0.0008	0.0010	0.0020	0.0030
$X_i = b + \frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	8.883	3.678	2.052	1.857	1.466	1.336
$R_i = a + \frac{a' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	719.838	240.003	90.055	72.061	36.074	24.078

$Z_i = \sqrt{(R_i)^2 + (X_i)^2}$	ОМ	719.892	240.032	90.079	72.085	36.104	24.115
$I''_i = \frac{U_1}{Z_i}$	А	0.306	0.917	2.442	3.052	6.094	9.123
$\frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	ОМ	7.808	2.603	0.976	0.781	0.390	0.260
$\cos\phi'_i = \frac{R_i}{Z_i}$	-	1	1	1	1	0.999	0.998
$\sin\phi'_i = \frac{X_i}{Z_i}$	-	0.012	0.015	0.023	0.026	0.041	0.055
$I_{1a_i} = I_{oa} + I''_i \cdot \cos\phi'_i$	А	1.205	1.816	3.341	3.950	6.988	10.008
$P_{1i} = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a_i}$	кВт	795.207	$1.198 \cdot 10^3$	$2.205 \cdot 10^3$	$2.607 \cdot 10^3$	$4.612 \cdot 10^3$	$6.605 \cdot 10^3$
$I_{1p_i} = I_\mu + I''_i \cdot \sin\phi'_i$	А	16.944	16.954	16.996	17.019	17.187	17.445
$I_{1i} = \sqrt{(I_{1a_i})^2 + (I_{1p_i})^2}$	А	16.986	17.051	17.321	17.471	18.554	20.112
$I'_{2i} = c_1 \cdot I''_i$	А	0.317	0.950	2.531	3.163	6.314	9.454
$P_{\rho 1i} = 3 \cdot (I_{1i})^2 \cdot r_1$	кВт	79.726	80.332	82.895	84.339	95.115	111.768
$P_{\rho 2i} = 3 \cdot (I'_{2i})^2 \cdot r'_2$	кВт	0.020	0.181	1.288	2.011	8.018	17.972
$P_{\rho \sigma i} = 0.005 \cdot P_{1i}$	кВт	3.976	5.992	11.025	13.036	23.06	33.027
$\Sigma P_i = P_{cm} + P_{Mex} + P_{\rho 1i} + P_{\rho 2i} + P_{\rho \sigma i}$	кВт	847.758	850.541	859.244	863.421	890.229	926.803
$P_{2i} = P_{1i} - \Sigma P_i$	кВт	-52.55	347.834	$1.346 \cdot 10^3$	$1.744 \cdot 10^3$	$3.722 \cdot 10^3$	$5.679 \cdot 10^3$
$\eta_i = 1 - \frac{\Sigma P_i}{P_{1i}}$	-	-0.066	0.290	0.610	0.669	0.807	0.860
$\cos\phi_i = \frac{I_{1a_i}}{I_{1i}}$	-	0.071	0.106	0.193	0.226	0.377	0.498
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>					
		<b>0.0050</b>	<b>0.0070</b>	<b>0.0090</b>	<b>0.0100</b>	<b>0.0130</b>	<b>0.0150</b>
$X_i = b + \frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	ОМ	1.232	1.187	1.163	1.154	1.136	1.128
$R_i = a + \frac{a' \cdot r'_2}{s_i}$	ОМ	14.481	10.368	8.084	7.284	5.623	4.885
$Z_i = \sqrt{(R_i)^2 + (X_i)^2}$	ОМ	14.534	10.436	8.167	7.375	5.736	5.013
$I''_i = \frac{U_1}{Z_i}$	А	15.137	21.080	26.939	29.832	38.351	43.884
$\frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	ОМ	0.156	0.112	0.087	0.078	0.060	0.052
$\cos\phi'_i = \frac{R_i}{Z_i}$	-	0.996	0.994	0.990	0.988	0.980	0.974

$\sin\phi'_i = \frac{X_i}{Z_i}$	-	0.085	0.114	0.142	0.156	0.198	0.225
$I_{1a_i} = I_{oa} + I''_i \cdot \cos\phi'_i$	A	15.982	21.843	27.563	30.364	38.491	43.658
$P_{1_i} = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a_i}$	кВт	$1.055 \cdot 10^4$	$1.442 \cdot 10^4$	$1.819 \cdot 10^4$	$2.004 \cdot 10^4$	$2.54 \cdot 10^4$	$2.881 \cdot 10^4$
$I_{1p_i} = I_\mu + I''_i \cdot \sin\phi'_i$	A	18.223	19.338	20.778	21.608	24.535	26.814
$I_{1_i} = \sqrt{(I_{1a_i})^2 + (I_{1p_i})^2}$	A	24.239	29.173	34.519	37.267	45.645	51.235
$I'_{2_i} = c_1 \cdot I''_i$	A	15.686	21.845	27.915	30.913	39.742	45.475
$P_{\vartheta 1_i} = 3 \cdot (I_{1_i})^2 \cdot r_1$	кВт	162.333	235.161	329.178	383.751	575.686	725.313
$P_{\vartheta 2_i} = 3 \cdot (I'_{2_i})^2 \cdot r'_2$	кВт	49.479	95.956	156.703	192.172	317.604	415.858
$P_{\text{доо}\bar{\sigma}_i} = 0.005 \cdot P_{1_i}$	кВт	52.741	72.081	90.959	100.20	127.02	144.072
$\Sigma P_i = P_{cm} + P_{mex} + P_{\vartheta 1_i} + P_{\vartheta 2_i} + P_{\text{доо}\bar{\sigma}_i}$	кВт	$1.029 \cdot 10^3$	$1.167 \cdot 10^3$	$1.341 \cdot 10^3$	$1.44 \cdot 10^3$	$1.784 \cdot 10^3$	$2.049 \cdot 10^3$
$P_{2_i} = P_{1_i} - \Sigma P_i$	кВт	$9.52 \cdot 10^3$	$1.325 \cdot 10^4$	$1.685 \cdot 10^4$	$1.86 \cdot 10^4$	$2.362 \cdot 10^4$	$2.677 \cdot 10^4$
$\eta_i = 1 - \frac{\Sigma P_i}{P_{1_i}}$	-	0.902	0.919	0.926	0.928	0.930	0.929
$\cos\phi_i = \frac{I_{1a_i}}{I_{1_i}}$	-	0.659	0.749	0.799	0.815	0.843	0.852
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>					
		<b>0.0170</b>	<b>0.0200</b>	<b>0.0210</b>	<b>0.0225</b>	<b>0.0250</b>	<b>0.0280</b>
$X_i = b + \frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	1.122	1.115	1.113	1.111	1.107	1.104
$R_i = a + \frac{a' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	4.320	3.685	3.514	3.285	2.965	2.657
$Z_i = \sqrt{(R_i)^2 + (X_i)^2}$	Ом	4.463	3.850	3.686	3.468	3.165	2.877
$I''_i = \frac{U_1}{Z_i}$	A	49.29	57.142	59.689	63.44	69.505	76.468
$\frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	0.046	0.039	0.037	0.035	0.031	0.028
$\cos\phi'_i = \frac{R_i}{Z_i}$	-	0.968	0.957	0.953	0.947	0.937	0.923
$\sin\phi'_i = \frac{X_i}{Z_i}$	-	0.251	0.290	0.302	0.320	0.350	0.384
$I_{1a_i} = I_{oa} + I''_i \cdot \cos\phi'_i$	A	48.606	55.593	57.801	60.998	66.013	71.515
$P_{1_i} = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a_i}$	кВт	$3.208 \cdot 10^4$	$3.669 \cdot 10^4$	$3.815 \cdot 10^4$	$4.026 \cdot 10^4$	$4.357 \cdot 10^4$	$4.72 \cdot 10^4$
$I_{1p_i} = I_\mu + I''_i \cdot \sin\phi'_i$	A	29.328	33.488	34.966	37.257	41.251	46.278
$I_{1_i} = \sqrt{(I_{1a_i})^2 + (I_{1p_i})^2}$	A	56.769	64.90	67.554	71.476	77.842	85.183

$I'_{2_i} = c_1 \cdot I''_i$	А	51.077	59.214	61.853	65.74	72.024	79.24
$P_{\rho_{1_i}} = 3 \cdot (I_{1_i})^2 \cdot r_1$	кВт	890.47	$1.164 \cdot 10^3$	$1.261 \cdot 10^3$	$1.412 \cdot 10^3$	$1.674 \cdot 10^3$	$2.005 \cdot 10^3$
$P_{\rho_{2_i}} = 3 \cdot (I'_{2_i})^2 \cdot r'_2$	кВт	524.612	705.087	769.331	869.064	$1.043 \cdot 10^3$	$1.263 \cdot 10^3$
$P_{\rho_{\sigma\sigma_i}} = 0.005 \cdot P_{1_i}$	кВт	160.401	183.456	190.743	201.292	217.844	236.001
$\Sigma P_i = P_{cm} + P_{mex} + P_{\rho_{1_i}} + P_{\rho_{2_i}} + P_{\rho_{\sigma\sigma_i}}$	кВт	$2.34 \cdot 10^3$	$2.816 \cdot 10^3$	$2.985 \cdot 10^3$	$3.246 \cdot 10^3$	$3.699 \cdot 10^3$	$4.268 \cdot 10^3$
$P_{2_i} = P_{1_i} - \Sigma P_i$	кВт	$2.974 \cdot 10^4$	$3.387 \cdot 10^4$	$3.516 \cdot 10^4$	$3.701 \cdot 10^4$	$3.987 \cdot 10^4$	$4.293 \cdot 10^4$
$\eta_i = 1 - \frac{\Sigma P_i}{P_{1_i}}$	-	0.927	0.923	0.922	0.919	0.915	0.910
$\cos \phi_i = \frac{I_{1a_i}}{I_{1_i}}$	-	0.856	0.857	0.856	0.853	0.848	0.840
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>					
		<b>0.0300</b>	<b>0.0350</b>				
$X_i = b + \frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	1.102	1.098				
$R_i = a + \frac{a' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	2.485	2.143				
$Z_i = \sqrt{(R_i)^2 + (X_i)^2}$	Ом	2.719	2.408				
$I''_i = \frac{U_1}{Z_i}$	А	80.918	91.370				
$\frac{b' \cdot r'_2}{s_i}$	Ом	0.026	0.022				
$\cos \phi'_i = \frac{R_i}{Z_i}$	-	0.914	0.890				
$\sin \phi'_i = \frac{X_i}{Z_i}$	-	0.405	0.456				
$I_{1a_i} = I_{oa} + I''_i \cdot \cos \phi'_i$	А	74.873	82.211				
$P_{1_i} = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a_i}$	кВт	$4.942 \cdot 10^4$	$5.426 \cdot 10^4$				
$I_{1p_i} = I_{\mu} + I''_i \cdot \sin \phi'_i$	А	49.736	58.615				
$I_{1_i} = \sqrt{(I_{1a_i})^2 + (I_{1p_i})^2}$	А	89.887	100.968				
$I'_{2_i} = c_1 \cdot I''_i$	А	83.852	94.683				
$P_{\rho_{1_i}} = 3 \cdot (I_{1_i})^2 \cdot r_1$	кВт	$2.232 \cdot 10^3$	$2.817 \cdot 10^3$				
$P_{\rho_{2_i}} = 3 \cdot (I'_{2_i})^2 \cdot r'_2$	кВт	$1.414 \cdot 10^3$	$1.803 \cdot 10^3$				
$P_{\rho_{\sigma\sigma_i}} = 0.005 \cdot P_{1_i}$	кВт	247.080	271.298				
$\Sigma P_i = P_{cm} + P_{mex} + P_{\rho_{1_i}} + P_{\rho_{2_i}} + P_{\rho_{\sigma\sigma_i}}$	кВт	$4.657 \cdot 10^3$	$5.655 \cdot 10^3$				

$P_{2_i} = P_{1_i} - \Sigma P_i$	кВт	$4.476 \cdot 10^4$	$4.860 \cdot 10^4$
$\eta_i = 1 - \frac{\Sigma P_i}{P_{1_i}}$	-	0.906	0.896
$\cos \phi_i = \frac{I_{1a_i}}{I_{1_i}}$	-	0.833	0.814

По результатам расчета были построены характеристики, представленные в приложении А. По зависимости  $s = f(P_2)$  уточняем значение номинального скольжения  $s_n = 0.0225$ . По зависимостям  $\eta = f(P_2)$  и  $\cos \varphi = f(P_2)$  уточняем значения КПД  $\eta = 0.919$  и  $\cos \varphi = 0.853$ .

### 1.9 Расчёт пусковых характеристик

Под пусковыми характеристиками понимают зависимости пускового момента и пускового тока от скольжения, т.е. зависимости  $M_n^* = f(s)$  и  $I_n^* = f(s)$ .

Расчет приведен для скольжения  $s = 1$ .

Данные расчета остальных точек сведены в таблице 2, по данным которых строятся зависимости которые представлены в приложении Б.

Расчет токов с учетом влияния изменения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учета влияния насыщения от полей рассеяния)

Высота стержня в пазу находится следующим образом

$$h_c = h_{np} - h_{u2} = 0.029 - 7.5 \cdot 10^{-4} = 0.0284 \text{ м} \quad (141)$$

При литой алюминиевой обмотке ротора и температуре стержня  $115^\circ\text{C}$  приведённая высота стержня подсчитывается по [1, стр. 427]

$$\xi_j = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_j} = 63.61 \cdot 0.0284 \cdot \sqrt{1} = 1.804 \quad (142)$$

Для определения глубины проникновения тока  $hr$  используются зависимости изображённые на [1, стр. 428]

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

$$hr_j = \frac{h_c}{1 + \phi_j} = \frac{0.0284}{1 + 0.548} = 0.0171 \quad (143)$$

$$\text{где } \phi_j = \begin{cases} \text{linterp}(xfi, yfi, \xi_j) \\ (\xi_j - 1) \text{ if } \xi_j > 4 \\ \left[ 0.089 \cdot (\xi_j)^4 \right] \text{ if } \xi_j < 1 \end{cases} \quad (144)$$

$$\text{где } xfi = \begin{pmatrix} 1.0 \\ 1.2 \\ 1.4 \\ 1.6 \\ 1.8 \\ 2.0 \\ 4.0 \end{pmatrix}$$

$$\text{где } yfi = \begin{pmatrix} 0.10 \\ 0.15 \\ 0.25 \\ 0.42 \\ 0.65 \\ 0.90 \\ 3.0 \end{pmatrix}$$

$$br_j = b_{1p} - \frac{b_{1p} - b_{2p}}{h_{1p}} \left( hr_j - \frac{b_{1p}}{2} \right) = 0.013 - \frac{0.013 - 8.54 \cdot 10^{-3}}{0.018} \left( 0.017 - \frac{0.013}{2} \right) = 0.01m \quad (145)$$

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

$$\begin{aligned} q_{r_j} &= \frac{\pi \cdot b_{1p}^2}{8} + \frac{b_{1p} + br_j}{2} \cdot \left( hr_j - \frac{b_{1p}}{2} \right) = \\ &= \frac{3.14 \cdot 0.013^2}{8} + \frac{0.013 + 0.01}{2} \cdot \left( 0.017 - \frac{0.013}{2} \right) = 1.88 \cdot 10^{-4} \end{aligned} \quad (146)$$

Коэффициент  $kr$  определяется по отношению площадей всего сечения стержня и сечения ограниченного высотой  $hr$  по [1, стр. 429]

$$kr_j = \frac{q_c}{q_{r_j}} = \frac{2.82 \cdot 10^{-4}}{1.88 \cdot 10^{-4}} = 1.499 \quad (147)$$

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

$$KR_j = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (kr_j - 1) = 1 + \frac{3.555 \cdot 10^{-5}}{4.959 \cdot 10^{-5}} \cdot (1.499 - 1) = 1.358 \quad (148)$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом вытеснения тока определяется по [1, стр. 429]

$$r_{2\xi j} = r_2 \cdot KR_j = 4.959 \cdot 10^{-5} \cdot 1.358 = 6.735 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \quad (149)$$

Приведённое активное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом вытеснения тока находится следующим образом

$$r'_{2\xi j} = r'_2 \cdot KR_j = 0.067 \cdot 1.358 = 0.091 \text{ Ом} \quad (150)$$

Коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока определяется по [1, стр. 431]

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2}} \quad (151)$$

где  $\lambda_{n2\xi}$  определяется по [1, стр. 469]

$$\begin{aligned} \lambda_{n2\xi} &= \left[ \frac{h_0}{3 \cdot b_{1p}} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot b_{1p}^2}{8 \cdot q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{u2}}{2 \cdot b_{1p}} \right] \cdot k_{\delta j} + \frac{h_{u2}}{b_{u2}} = \\ &= \left[ \frac{0.023}{3 \cdot 0.013} \cdot \left( 1 - \frac{3.14 \cdot 0.013^2}{8 \cdot 2.82 \cdot 10^{-4}} \right)^2 + 0.66 - \frac{1.5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0.013} \right] \cdot 0.801 + \frac{7.5 \cdot 10^{-4}}{1.5 \cdot 10^{-3}} = 1.26 \end{aligned} \quad (152)$$

Тогда

$$K_{x_j} = \frac{\lambda_{n2\xi_j} + \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2}} = \frac{1.26 + 0.383 + 3.325}{1.455 + 0.383 + 3.325} = 0.963$$

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

$$x'_{2\xi j} = x'_2 \cdot K_{x_j} = 0.566 \cdot 0.963 = 0.545 \quad (153)$$

Пусковые параметры определяются по [1, стр. 437]

$$x_{12n} = x_{12} \cdot \frac{F_u}{F_\delta} = 12.536 \cdot \frac{1.238 \cdot 10^3}{836.976} = 18.536 \text{ Ом} \quad (154)$$

При этом допущениях коэффициент

$$c_{1n} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}} = 1 + \frac{0.451}{18.536} = 1.024 \quad (155)$$

Сопровитления  $\Gamma$  - образной ветви схемы замещения определяются по [1, стр. 437]

$$R_{n_j} = r_1 + c_{1n} \cdot \frac{r'_{2\xi_j}}{s_j} = 0.092 + 1.024 \cdot \frac{0.091}{1} = 0.19 \quad (156)$$

$$X_{n_j} = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi_j} = 0.451 + 1.024 \cdot 0.545 = 1.01 \quad (157)$$

Ток в обмотке ротора находится по [1, стр. 437]

$$I'_{2n_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j})^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0.185)^2 + (1.01)^2}} = 214.3 \quad (158)$$

Пусковой ток в обмотке статора определяется по [1, стр. 437]

$$I_{1n_j} = I'_{2n_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})^2}}{x_{12n} \cdot c_{1n}} = 214.3 \cdot \frac{\sqrt{(0.185)^2 + (1.01 + 18.536)^2}}{18.536 \cdot 1.024} = 220.6 \quad (159)$$

Тогда характеризующие пусковые данные машины кратность тока и момента будут иметь следующие значения по [1, стр. 437]

$$I_{1,j} = \frac{I_{1n_j}}{I_{1н}} = \frac{220.62}{71.476} = 3.09 \quad (160)$$

$$M_{n,j} = \left( \frac{I'_{2n_j}}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot \left( KR_j \cdot \frac{s_{н}}{s_j} \right) = \left( \frac{214.303}{65.74} \right)^2 \cdot \left( 1.358 \cdot \frac{0.023}{1} \right) = 0.32 \quad (161)$$

Таблица 1.2 – Расчёт пусковых характеристики асинхронного двигателя

Расчетные формулы	Ед.	Скольжение				
		1.000	0.900	0.800	0.700	0.600
$\xi_j = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_j}$	-	1.804	1.712	1.614	1.510	1.398
$\varphi_j(\xi)$	-	0.655	0.548	0.436	0.343	0.249

$hr_j = \frac{h_c}{1 + \varphi_j}$	М	0.0171	0.0183	0.0198	0.0211	0.0227
$kr_j = \frac{q_c}{q_{r_j}}$	-	1.499	1.410	1.318	1.243	1.169
$KR_j = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (kr_j - 1)$	-	1.358	1.294	1.228	1.174	1.121
$r'_{2\xi_j} = r'_2 \cdot KR_j$	ОМ	0.091	0.087	0.082	0.079	0.075
$k_{\delta_j} = \varphi_j(\xi)$	-	0.801	0.825	0.850	0.878	0.896
$\lambda_{n1nac_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1nac_j}$	-	0.830	0.836	0.842	0.849	0.856
$K_{x_j} = \frac{\lambda_{n2\xi_j} + \lambda_{r2} + \lambda_{\delta2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{r2} + \lambda_{\delta2}}$	-	0.963	0.968	0.972	0.977	0.981
$x'_{2\xi_j} = x'_2 \cdot K_{x_j}$	ОМ	0.545	0.548	0.551	0.554	0.555
$R_{n_j} = r_1 + c_{1n} \cdot \frac{r'_{2\xi_j}}{s_j}$	ОМ	0.190	0.190	0.200	0.210	0.220
$X_{n_j} = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi_j}$	ОМ	1.010	1.010	1.020	1.020	1.020
$I'_{2n_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j})^2}}$	А	214.3	213.6	212.8	211.8	210.8
$I_{1n_j} = I'_{2n_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})^2}}{x_{12n} \cdot c_{1n}}$	А	220.6	219.9	219.1	218.1	217.2
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>				
		<b>0.500</b>	<b>0.400</b>	<b>0.300</b>	<b>0.200</b>	<b>0.150</b>
$\xi_j = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_j}$	-	1276	1.141	0.988	0.807	0.699
$\varphi_j(\xi)$	-	0.188	0.135	0.085	0.038	0.021
$hr_j = \frac{h_c}{1 + \varphi_j}$	М	0.0239	0.025	0.0261	0.0273	0.0278
$kr_j = \frac{q_c}{q_{r_j}}$	-	1.121	1.081	1.043	1.008	0.996
$KR_j = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (kr_j - 1)$	-	1.087	1.058	1.031	1.006	0.997
$r'_{2\xi_j} = r'_2 \cdot KR_j$	ОМ	0.073	0.071	0.069	0.067	0.067
$k_{\delta_j} = \varphi_j(\xi)$	-	0.916	0.937	0.960	0.968	0.972
$\lambda_{n1nac_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1nac_j}$	-	0.863	0.872	0.880	0.901	0.924
$K_{x_j} = \frac{\lambda_{n2\xi_j} + \lambda_{r2} + \lambda_{\delta2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{r2} + \lambda_{\delta2}}$	-	0.984	0.988	0.993	0.994	0.995
$x'_{2\xi_j} = x'_2 \cdot K_{x_j}$	ОМ	0.558	0.560	0.562	0.563	0.563

$R_{n_j} = r_1 + c_{1n} \cdot \frac{r'_{2\xi_j}}{s_j}$	Ом	0.240	0.270	0.330	0.440	0.550
$X_{n_j} = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi_j}$	Ом	1.020	1.020	1.030	1.030	1.030
$I'_{2n_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j})^2}}$	А	209.5	207.5	204.1	197	188.8
$I_{1n_j} = I'_{2n_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})}}{x_{12n} \cdot c_{1n}}$	А	215.8	213.8	210.3	203	194.6
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>				
		<b>0.100</b>	<b>0.080</b>	<b>0.050</b>	<b>0.030</b>	<b>0.010</b>
$\xi_j = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_j}$	-	0.571	0.510	0.403	0.313	0.180
$\varphi_j(\xi)$	-	$9.432 \cdot 10^{-3}$	$6.036 \cdot 10^{-3}$	$2.358 \cdot 10^{-3}$	$8.489 \cdot 10^{-4}$	$9.432 \cdot 10^{-5}$
$hr_j = \frac{h_c}{1 + \varphi_j}$	м	0.0281	0.0282	0.0283	0.0283	0.0284
$kr_j = \frac{q_c}{q_{r_j}}$	-	0.987	0.985	0.982	0.981	0.981
$KR_j = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (kr_j - 1)$	-	0.991	0.989	0.987	0.986	0.986
$r'_{2\xi_j} = r'_2 \cdot KR_j$	Ом	0.066	0.066	0.066	0.066	0.066
$k_{\partial_j} = \varphi_j(\xi)$	-	0.977	0.980	0.984	0.987	0.993
$\lambda_{n1nac_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1nac_j}$	-	0.961	0.993	1.082	1.192	1.314
$K_{x_j} = \frac{\lambda_{n2\xi_j} + \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\partial 2}}$	-	0.996	0.996	0.997	0.998	0.999
$x'_{2\xi_j} = x'_2 \cdot K_{x_j}$	Ом	0.564	0.564	0.565	0.665	0.566
$R_{n_j} = r_1 + c_{1n} \cdot \frac{r'_{2\xi_j}}{s_j}$	Ом	0.770	0.940	1.450	2.350	6.860
$X_{n_j} = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi_j}$	Ом	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030
$I'_{2n_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j})^2}}$	А	171	157.8	123.8	85.8	31.7
$I_{1n_j} = I'_{2n_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})}}{x_{12n} \cdot c_{1n}}$	А	176.4	162.8	128	89	34.6
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>				
		<b>0.005</b>	<b>0.001</b>			
$\xi_j = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_j}$	-	0.128	0.057			
$\varphi_j(\xi)$	-	$2.358 \cdot 10^{-5}$	$9.432 \cdot 10^{-7}$			

$hr_j = \frac{h_c}{1 + \varphi_j}$	М	0.0284	0.0284
$kr_j = \frac{q_c}{q_{r_j}}$	-	0.980	0.980
$KR_j = 1 + \frac{r_c}{r_2} \cdot (kr_j - 1)$	-	0.986	0.986
$r'_{2\xi j} = r'_2 \cdot KR_j$	ОМ	0.066	0.066
$k_{\delta_j} = \varphi_j(\xi)$	-	0.995	0.998
$\lambda_{n1нас_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1нас_j}$	-	1.330	1.340
$K_{x_j} = \frac{\lambda_{n2\xi_j} + \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{\delta 2}}$	-	0.999	1.000
$x'_{2\xi_j} = x'_2 \cdot K_{x_j}$	ОМ	0.566	0.566
$R_{n_j} = r_1 + c_{1n} \cdot \frac{r'_{2\xi_j}}{s_j}$	ОМ	13.63	67.79
$X_{n_j} = x_1 + c_{1n} \cdot x'_{2\xi_j}$	ОМ	1.030	1.030
$I'_{2n_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j})^2}}$	А	16.1	3.2
$I_{1n_j} = I'_{2n_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})^2}}{x_{12n} \cdot c_{1n}}$	А	20.2	12.1

Расчет пусковых характеристик с учетом вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния.

Подробный расчёт приведён для скольжения  $s = 1$

Расчёт пусковых характеристики с учетом вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния для остальных точек сведены в таблице 3.

Для учёт влияния насыщения на параметры вводится коэффициент насыщения [1, стр. 432]

$$k_{нас_j} = 1.50 \dots 1.02$$

Средняя МДС обмотки, отнесённая к одному пазу обмотки статора определяется по [1, стр. 432]

$$ky1 = \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right) = \sin\left(\frac{3.14}{2} \cdot 1.3\right) = 0.891 \quad (162)$$

$$\begin{aligned}
F_{n.cp_j} &= 0.7 \cdot \frac{k_{нас_j} \cdot I_{1n_j} \cdot u_n}{1} \cdot \left( k' \beta + ky1 \cdot K_{о61} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = \\
&= 0.7 \cdot \frac{1.5 \cdot 220.62 \cdot 10}{1} \cdot \left( 0.883 + 0.891 \cdot 0.902 \cdot \frac{36}{26} \right) = 4.51 \cdot 10^3 \text{ A} \quad (163)
\end{aligned}$$

По средней МДС рассчитывается фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре по [1, стр. 433]

$$B_{\varphi\delta} = \frac{F_{n.cp} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N} = \frac{4.508 \cdot 10^3 \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot 6.144 \cdot 10^{-4} \cdot 0.926} = 4.954 \quad (164)$$

где  $C_N$  определяется по [1,стр.433]

$$C_N = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0.64 + 2.5 \cdot \sqrt{\frac{6.144 \cdot 10^{-4}}{0.02 + 0.027}} = 0.926 \quad (165)$$

Где

$$xbf = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{pmatrix}$$

$$ybf = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0.97 \\ 0.86 \\ 0.58 \\ 0.48 \\ 0.41 \\ 0.33 \end{pmatrix}$$

$$k\delta prj = \text{linterp}(xbf, ybf, B_{\varphi\delta_j})$$

Для полученного значения фиктивной индукции потока рассеяния находим значение коэффициента  $k\delta prj$  по [1, стр. 432]

$$c_{\vartheta 1j} = (t_{z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k\delta prj) = (0.02 - 3.7 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0.485) = 8.3 \cdot 10^{-3} \quad (166)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения находится по [1, стр. 434]

$$\Delta\lambda_{n1насj} = \frac{h_{u1} + 0.58 \cdot h_{\kappa}}{b_{u1}} \cdot \frac{c_{\vartheta 1j}}{c_{\vartheta 1j} + 1.5 \cdot b_{u1}} = \frac{1 \cdot 10^{-3} + 0.58 \cdot 3.854 \cdot 10^{-3}}{3.7 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{8.296 \cdot 10^{-3}}{8.296 \cdot 10^{-3} + 1.5 \cdot 3.7 \cdot 10^{-3}} = 0.524 \quad (167)$$

$$\lambda_{n1насj} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1насj} = 1.354 - 0.524 = 0.83 \quad (168)$$

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

$$\lambda_{\partial 1насj} = \lambda_{\partial} \cdot k\delta prj = 2.609 \cdot 0.485 = 1.26 \quad (169)$$

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

$$x_{1насj} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1насj} + \lambda_{\partial 1насj} + \lambda_l}{\lambda_n + \lambda_{\partial} + \lambda_l} = 0.451 \cdot \frac{0.83 + 1.264 + 0.667}{1.354 + 2.609 + 0.667} = 0.27 \quad (170)$$

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

$$\lambda_{n2\xi насi} = \lambda_{n2\xi} - \Delta\lambda_{n2насj} = 1.264 - 0.449 = 0.82 \quad (171)$$

$$\Delta\lambda_{n2насj} = \frac{h_{u2}}{b_{u2}} \cdot \frac{c_{\vartheta 2j}}{b_{u2} + c_{2j}} = \frac{7.5 \cdot 10^{-4}}{1.5 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{0.01}{1.5 \cdot 10^{-3} + 0.01} = 0.449 \quad (172)$$

где  $c_{\vartheta 2}$  определяется по [1, стр. 433]

$$c_{\vartheta 2} = (t_{z2} - b_{u2}) \cdot (1 - x_{\delta}) = (0.027 - 1.5 \cdot 10^{-3}) \cdot (1 - 0.5) = 0.01 \quad (173)$$

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

$$\lambda_{\partial 2насj} = \lambda_{\partial 2} \cdot k\delta prj = 3.325 \cdot 0.485 = 1.61 \quad (174)$$

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

$$x'_{2\xi_{нас_j}} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xi_{нас_j}} + \lambda_{\partial 2\xi_{нас_j}} + \lambda_{n2}}{\lambda_{\partial 2} + \lambda_{n2} + \lambda_{n2}} = 0.566 \cdot \frac{0.815 + 1.611 + 0.383}{3.325 + 0.383 + 1.455} = 0.31 \quad (175)$$

Пусковой коэффициент с учётом влияния насыщения определяется по [1, стр. 437]

$$c_{1n.нас} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}} = 1 + \frac{836.976}{18.536} = 1.024 \quad (176)$$

Расчёт токов и моментов.

Сопротивления Г - образной ветви схемы замещения определяются по [1, стр. 437]

$$R_{n.нас_j} = r_1 + \frac{c_{1n.нас} \cdot r'_{2\xi_j}}{s_j} = 0.092 + \frac{1.024 \cdot 0.091}{1} = 0.19 \quad (177)$$

$$X_{n.нас_j} = x_{1нас_j} + c_{1n.нас} \cdot x'_{2\xi_{нас_j}} = 0.269 + 1.024 + 0.308 = 0.58 \quad (178)$$

$$I'_{2n.нас_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n.нас_j})^2 + (X_{n.нас_j})^2}} = \frac{220}{\sqrt{(0.19)^2 + (0.58)^2}} = 358.7 \quad (179)$$

Ток в обмотке статора находится по [1, стр. 437]

$$I_{1n.нас_j} = I'_{2n.нас_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})^2}}{x_{12n} \cdot c_{1n.нас}} = 358.7 \cdot \frac{\sqrt{(0.185)^2 + (1.01 + 18.536)^2}}{18.536 \cdot 1.024} = 369.3 \quad (180)$$

Коэффициент насыщения определяется по [1, стр. 432]

$$k_{нас2_j} = \frac{I_{1n.нас_j}}{I_{1n_j}} = \frac{369.279}{220.62} = 1.674 \quad (181)$$

Тогда пусковые данные машины кратность тока и момента будут иметь следующие значения по [1, стр. 437]

$$I_{1,j} = \frac{I_{1n.нас_j}}{I_{1н}} = \frac{369.279}{71.476} = 5.17 \quad (182)$$

$$M_{n_j} = \left( \frac{I'_{2n_{нас_j}}}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot \left( KR_j \cdot \frac{s_n}{s_j} \right) = \left( \frac{358.706}{65.74} \right) \cdot \left( 1.358 \cdot \frac{0.023}{1} \right) = 0.91 \quad (183)$$

Критическое скольжение определяется по [1, стр. 439]

$$s_{кр} = \frac{r'_2}{\frac{x_{1нас0}}{c_{1н.нас}} + x'_{2\xi_{нас0}}} = \frac{0.067}{\frac{0.269}{1.024} + 0.308} = 0.12 \quad (184)$$

Кратность пускового и максимального моментов и пускового тока спроектированного двигателя удовлетворяют требованиям ГОСТ.

Скорость вращения ротора об/мин.

$$n_{2_j} = \frac{f_1 \cdot 60 \cdot (1 - s_j)}{p} = \frac{50 \cdot 60 \cdot (1 - 1)}{2} = 0 \quad (185)$$

Полученный в расчете коэффициент насыщения

$$k_{нас2_j} = \frac{I_{1н.нас_j}}{I_{1н_j}} = \frac{369.279}{220.62} = 1.674$$

отличается от принятого  $k_{нас} = 1.5$  приблизительно до 11.588%, что вполне допустимо.

Таблица 1.3 – Расчёт пусковых характеристики асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором с учетом вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

Расчетные формулы	Ед.	Скольжение				
		1.000	0.900	0.800	0.700	0.600
$k_{нас}$	-	1.5	1.46	1.42	1.38	1.34
$F_{н.ср_j} = 0.7 \cdot \frac{k_{нас_j} \cdot I_{1н_j} \cdot u_n}{1} \cdot \left( k' \beta + ky1 \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	$4.51 \cdot 10^3$	$4.37 \cdot 10^3$	$4.24 \cdot 10^3$	$4.10 \cdot 10^3$	$3.96 \cdot 10^3$
$B_{\phi\delta} = \frac{F_{н.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	4.954	4.806	4.657	4.506	4.356
$c_{\omega 1_j} = (t_{Z1} - b_{\omega}) \cdot (1 - k\delta prj)$	м	$8.3 \cdot 10^{-3}$	$8.06 \cdot 10^{-3}$	$7.82 \cdot 10^{-3}$	$7.58 \cdot 10^{-3}$	$7.33 \cdot 10^{-3}$
$\lambda_{n1нас_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1нас_j}$	-	0.83	0.84	0.84	0.85	0.86
$\lambda_{\omega 1нас_j} = \lambda_{\omega} \cdot k\delta prj$	-	1.26	1.30	1.34	1.38	1.42

$x_{1нас_j} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1нас_j} + \lambda_{\partial1нас_j} + \lambda_{\lambda}}{\lambda_n + \lambda_{\partial} + \lambda_{\lambda}}$	ОМ	0.27	0.27	0.28	0.28	0.29
$c_{1н.нас} = 1 + \frac{x_1}{x_{12н}}$	-	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024
$c_{\partial 2} = (t_{Z2} - b_{u2}) \cdot (1 - x_{\delta})$	М	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
$\lambda_{n2\xi_{нас_i}} = \lambda_{n2\xi_i} - \Delta\lambda_{n2нас_j}$	-	0.82	0.84	0.87	0.89	0.91
$\lambda_{\partial 2нас_j} = \lambda_{\partial 2} \cdot k\delta prj$	-	1.61	1.66	1.71	1.76	1.81
$x'_{2\xi_{нас_j}} = x'_{2'} \cdot \frac{\lambda_{n2\xi_{нас_j}} + \lambda_{\partial 2\xi_{нас_j}} + \lambda_{\lambda 2}}{\lambda_{\partial 2} + \lambda_{\lambda 2} + \lambda_{n2}}$	ОМ	0.31	0.32	0.32	0.33	0.34
$R_{н.нас_j} = r_1 + \frac{c_{1н.нас} \cdot r'_{2\xi_j}}{s_j}$	ОМ	0.19	0.19	0.20	0.21	0.22
$X_{н.нас_j} = x_{1нас_j} + c_{1н.нас} \cdot x'_{2\xi_{нас_j}}$	ОМ	0.58	0.60	0.61	0.62	0.64
$I'_{2н.нас_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{н.нас_j})^2 + (X_{н.нас_j})^2}}$	А	358.7	350.9	343.1	334.9	327
$I_{1н.нас_j} = I'_{2н.нас_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{н_j})^2 + (X_{н_j} + x_{12н})^2}}{x_{12н} \cdot c_{1н.нас}}$	А	369.3	361.3	353.3	344.9	336.8
$k_{нас2_j} = \frac{I_{1н.нас_j}}{I_{1н_j}}$	-	1.674	1.643	1.612	1.581	1.551
$I_{1,j} = \frac{I_{1н.нас_j}}{I_{1н}}$	-	5.17	5.05	4.94	4.83	4.71
$M_{н_j} = \left( \frac{I'_{2н.нас_j}}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot \left( KR_j \cdot \frac{S_n}{S_j} \right)$	-	0.91	0.92	0.94	0.98	1.04
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>				
		<b>0.500</b>	<b>0.400</b>	<b>0.300</b>	<b>0.200</b>	<b>0.150</b>
$k_{нас}$	-	1.3	1.26	1.24	1.20	1.16
$F_{н.ср_j} = 0.7 \cdot \frac{k_{нас_j} \cdot I_{1н_j} \cdot u_n}{1} \cdot \left( k' \beta + ky1 \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	$3.82 \cdot 10^3$	$3.67 \cdot 10^3$	$3.55 \cdot 10^3$	$3.32 \cdot 10^3$	$3.08 \cdot 10^3$
$B_{\phi\delta} = \frac{F_{н.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	4.200	4.032	3.904	3.647	3.380
$c_{\partial 1_j} = (t_{Z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k\delta prj)$	М	$7.08 \cdot 10^{-3}$	$6.81 \cdot 10^{-3}$	$6.54 \cdot 10^{-3}$	$5.97 \cdot 10^{-3}$	$5.36 \cdot 10^{-3}$
$\lambda_{n1нас_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1нас_j}$	-	0.86	0.87	0.88	0.90	0.92
$\lambda_{\partial 1нас_j} = \lambda_{\partial} \cdot k\delta prj$	-	1.46	1.51	1.55	1.64	1.74
$x_{1нас_j} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1нас_j} + \lambda_{\partial 1нас_j} + \lambda_{\lambda}}{\lambda_n + \lambda_{\partial} + \lambda_{\lambda}}$	ОМ	0.29	0.30	0.30	0.31	0.32

$c_{1n.nac} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}}$	-	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024
$c_{\alpha 2} = (t_{Z2} - b_{u2}) \cdot (1 - x_{\delta})$	М	0.01	0.01	0.01	$9.55 \cdot 10^{-3}$	$8.58 \cdot 10^{-3}$
$\lambda_{n2\xi_{nac_i}} = \lambda_{n2\xi_i} - \Delta\lambda_{n2nac_j}$	-	0.93	0.96	0.98	0.99	1.00
$\lambda_{\delta 2nac_j} = \lambda_{\delta 2} \cdot k\delta prj$	-	1.86	1.92	1.97	2.09	2.22
$x'_{2\xi_{nac_j}} = x'_2 \cdot \frac{\lambda_{n2\xi_{nac_j}} + \lambda_{\delta 2\xi_{nac_j}} + \lambda_{n2}}{\lambda_{\delta 2} + \lambda_{n2} + \lambda_{n2}}$	ОМ	0.35	0.36	0.37	0.38	0.40
$R_{n.nac_j} = r_1 + \frac{c_{1n.nac} \cdot r'_{2\xi_j}}{s_j}$	ОМ	0.24	0.27	0.33	0.44	0.55
$X_{n.nac_j} = x_{nac_j} + c_{1n.nac} \cdot x'_{2\xi_{nac_j}}$	ОМ	0.65	0.66	0.68	0.70	0.73
$I'_{2n.nac_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n.nac_j})^2 + (X_{n.nac_j})^2}}$	А	318	307	292.7	265.9	241.1
$I_{1n.nac_j} = I'_{2n.nac_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})^2}}{x_{12n} \cdot c_{1n.nac}}$	А	327.5	316.3	301.6	274.1	248.5
$к_{nac2_j} = \frac{I_{1n.nac_j}}{I_{1n_j}}$	-	1.518	1.479	1.434	1.350	1.277
$I_{1,j} = \frac{I_{1n.nac_j}}{I_{1n}}$	-	4.58	4.42	4.22	3.83	3.48
$M_{n_j} = \left( \frac{I'_{2n.nac_j}}{I'_{2n}} \right)^2 \cdot \left( KR_j \cdot \frac{s_n}{s_j} \right)$	-	1.14	1.30	1.53	1.85	2.01
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>				
		<b>0.100</b>	<b>0.080</b>	<b>0.050</b>	<b>0.030</b>	<b>0.010</b>
$k_{nac}$	-	1.14	1.12	1.10	1.08	1.06
$F_{n.cpj} = 0.7 \cdot \frac{k_{nac_j} \cdot I_{1n_j} \cdot u_n}{1} \cdot \left( k' \beta + ky1 \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	$2.74 \cdot 10^3$	$2.48 \cdot 10^3$	$1.92 \cdot 10^3$	$1.31 \cdot 10^3$	499.92
$B_{\varphi\delta} = \frac{F_{n.cpj} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	3.010	2.729	2.107	1.439	0.549
$c_{\alpha 1_j} = (t_{Z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k\delta prj)$	М	$4.53 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$	$1.26 \cdot 10^{-3}$	$2.56 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_{n1nac_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1nac_j}$	-	0.96	0.99	1.08	1.19	1.31
$\lambda_{\delta 1nac_j} = \lambda_{\delta} \cdot k\delta prj$	-	1.88	1.98	2.20	2.41	2.57
$x_{1nac_j} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1nac_j} + \lambda_{\delta 1nac_j} + \lambda_n}{\lambda_n + \lambda_{\delta} + \lambda_n}$	ОМ	0.34	0.35	0.39	0.42	0.44
$c_{1n.nac} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}}$	-	1.024	1.024	1.024	1.024	1.024

$c_{\varepsilon 2} = (t_{Z2} - b_{u2}) \cdot (1 - x_{\delta})$	М	$7.25 \cdot 10^{-3}$	$6.24 \cdot 10^{-3}$	$3.99 \cdot 10^{-3}$	$2.02 \cdot 10^{-3}$	$4.25 \cdot 10^{-4}$
$\lambda_{n2\xi_{нас_i}} = \lambda_{n2\xi_i} - \Delta\lambda_{n2нас_j}$	-	1.02	1.03	1.08	1.16	1.34
$\lambda_{\partial 2нас_j} = \lambda_{\partial 2} \cdot k\delta prj$	-	2.39	2.52	2.81	3.07	3.27
$x'_{2\xi_{нас_j}} = x'_{2} \cdot \frac{\lambda_{n2\xi_{нас_j}} + \lambda_{\partial 2\xi_{нас_j}} + \lambda_{n2}}{\lambda_{\partial 2} + \lambda_{n2} + \lambda_{n2}}$	ОМ	0.42	0.43	0.47	0.51	0.55
$R_{n.нас_j} = r_1 + \frac{c_{1n.нас} \cdot r'_{2\xi_j}}{s_j}$	ОМ	0.77	0.94	1.45	2.35	6.86
$X_{n.нас_j} = x_{1нас_j} + c_{1n.нас} \cdot x'_{2\xi_{нас_j}}$	ОМ	0.77	0.80	0.86	0.93	1.00
$I'_{2n.нас_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n.нас_j})^2 + (X_{n.нас_j})^2}}$	А	202.1	178.4	130.5	87	31.7
$I_{1n.нас_j} = I'_{2n.нас_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12n})^2}}{x_{12n} \cdot c_{1n.нас}}$	А	208.4	184.1	134.8	90.3	34.6
$k_{нас2_j} = \frac{I_{1n.нас_j}}{I_{1n_j}}$	-	1.182	1.131	1.053	1.015	1.001
$I_{1,j} = \frac{I_{1n.нас_j}}{I_{1n}}$	-	2.92	2.58	1.89	1.26	0.48
$M_{n_j} = \left( \frac{I'_{2n.нас_j}}{I'_{2n}} \right)^2 \cdot \left( KR_j \cdot \frac{s_n}{s_j} \right)$	-	2.11	2.05	1.75	1.30	0.52
<b>Расчетные формулы</b>	<b>Ед.</b>	<b>Скольжение</b>				
		<b>0.005</b>	<b>0.001</b>			
$k_{нас}$	-	1.04	1.02			
$F_{n.ср_j} = 0.7 \cdot \frac{k_{нас_j} \cdot I_{1n_j} \cdot u_n}{1} \cdot \left( k' \beta + ky1 \cdot K_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right)$	А	286.34	167.55			
$B_{\varphi\delta} = \frac{F_{n.ср} \cdot 10^{-6}}{1.6 \cdot \delta \cdot C_N}$	Тл	0.315	0.184			
$c_{\varepsilon 1_j} = (t_{Z1} - b_{u1}) \cdot (1 - k\delta prj)$	М	$1.52 \cdot 10^{-4}$	$8.89 \cdot 10^{-5}$			
$\lambda_{n1нас_j} = \lambda_n - \Delta\lambda_{n1нас_j}$	-	1.33	1.34			
$\lambda_{\partial 1нас_j} = \lambda_{\partial} \cdot k\delta prj$	-	2.58	2.60			
$x_{1нас_j} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{n1нас_j} + \lambda_{\partial 1нас_j} + \lambda_n}{\lambda_n + \lambda_{\partial} + \lambda_n}$	ОМ	0.45	0.45			
$c_{1n.нас} = 1 + \frac{x_1}{x_{12n}}$	-	1.024	1.024			
$c_{\varepsilon 2} = (t_{Z2} - b_{u2}) \cdot (1 - x_{\delta})$	М	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$1.42 \cdot 10^{-4}$			
$\lambda_{n2\xi_{нас_i}} = \lambda_{n2\xi_i} - \Delta\lambda_{n2нас_j}$	-	1.38	1.41			

$\lambda_{\partial 2нас_j} = \lambda_{\partial 2} \cdot k\delta prj$	-	3.29	3.31
$x'_{2\xiнас_j} = x'_{2'} \cdot \frac{\lambda_{n2\xiнас_j} + \lambda_{\partial 2\xiнас_j} + \lambda_{n2}}{\lambda_{\partial 2} + \lambda_{n2} + \lambda_{n2}}$	ОМ	0.55	0.56
$R_{n.нас_j} = r_1 + \frac{c_{1n.нас} \cdot r'_{2\xi_j}}{s_j}$	ОМ	13.63	67.79
$X_{n.нас_j} = x_{1нас_j} + c_{1n.нас} \cdot x'_{2\xiнас_j}$	ОМ	1.01	1.02
$I'_{2н.нас_j} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_{n.нас_j})^2 + (X_{n.нас_j})^2}}$	А	16.1	3.20
$I_{1н.нас_j} = I'_{2н.нас_j} \cdot \frac{\sqrt{(R_{n_j})^2 + (X_{n_j} + x_{12н})^2}}{x_{12н} \cdot c_{1н.нас}}$	А	20.2	12.1
$кнас2_j = \frac{I_{1н.нас_j}}{I_{1н_j}}$	-	1.00	1.00
$I_{1,j} = \frac{I_{1н.нас_j}}{I_{1н}}$	-	0.28	0.17
$M_{n_j} = \left( \frac{I'_{2н.нас_j}}{I'_{2н}} \right)^2 \cdot \left( KR_j \cdot \frac{s_n}{s_j} \right)$	-	0.27	0.05

## 2. 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 с предельно допустимым для принятого класса изоляции перепадом температуры при классе нагревостойкости изоляции F – до плюс 115<sup>0</sup> С.

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри двигателя определяется по [1, стр. 449]

$$\Delta v_{нов1} = K \frac{P'_{эл1} + P_{ст.осн}}{\pi \cdot D \cdot l_{\delta} \cdot \alpha_1} = 0.20 \cdot \frac{724.07 + 514.237}{3.17 \cdot 0.227 \cdot 0.205 \cdot 115} = 14.707 \text{ К} \quad (186)$$

где  $K$  - коэффициент учитывающий, что часть потерь в сердечнике статора и в пазовой части обмотки передаётся через станину непосредственно в окружающую среду, находится по [1, стр. 450]

$$K = 0.20$$

$\alpha_1$  - коэффициент теплоотдачи с поверхности находится по [1, стр. 450]

$$\alpha_1 = 115$$

$P'_{\text{э.н1}}$  - электрические потери в обмотке статора в пазовой части, определяются по [1, стр. 449] с учетом того, что изоляция обмотки класса нагревостойкости F

$$P'_{\text{э.н1}} = 1.07 \cdot P_{\text{э.н}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\delta}}{l_{\text{cp}}} = 1.07 \cdot 1.412 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 0.205}{0.857} = 724.07 \text{ Вт} \quad (169)$$

Тогда

$$\Delta v_{\text{нов1}} = 14.707 \text{ К}$$

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора находится по [1, стр. 450]

$$\begin{aligned} \Delta v_{\text{из.н1}} &= \frac{P'_{\text{э.н1}}}{Z_1 \cdot \Pi_{\text{н1}} \cdot l_{\delta}} \cdot \left( \frac{b_{\text{из}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{\text{экв}}} \right) = \\ &= \frac{724.07}{36 \cdot 0.085 \cdot 0.205} \cdot \left( \frac{4 \cdot 10^{-4}}{0.16} + \frac{0.016 + 0.011}{16 \cdot 1.4} \right) = 4.273 \text{ К} \end{aligned} \quad (170)$$

где  $\Pi_{\text{н1}}$  - расчётный периметр поперечного сечения паза статора для полужакрытых трапецидальных пазов рассчитывается по [1, стр. 451]

$$\Pi_{\text{н1}} = 2 \cdot h_n + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0.029 + 0.016 + 0.011 = 0.085 \text{ м} \quad (171)$$

$\lambda_{\text{экв}}$  - средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции для класса нагревостойкости F, находится по [1, стр. 451]

$$\lambda_{\text{экв}} = 0.16 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

$\lambda'_{\text{экв}}$  - среднее значение коэффициента теплопроводности внутренней изоляции катушки всыпной обмотки, находится по [1, стр. 453], исходя из отношения.

$$\frac{d_{\text{эл}}}{d_{\text{из}}} = \frac{1.7 \cdot 10^{-3}}{1.785 \cdot 10^{-3}} = 0.952 \quad (172)$$

$$\lambda'_{\text{экв}} = 1.4 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$$

Тогда

$$\Delta v_{uz.n1} = 4.273 \text{ К}$$

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

$$l = a + b = 0.192 + 0.198 = 0.39 \quad (173)$$

$$= \frac{786.34}{2 \cdot 36 \cdot 0.085 \cdot 0.223} \cdot \left( \frac{4 \cdot 10^{-4}}{0.16} + \frac{0.029}{12 \cdot 1.4} \right) = 2.434 \text{ К} \quad (174)$$

где  $P'_{\text{э.л1}}$  - электрические потери в обмотке статора в пазовой части находятся по [1, стр. 449] с учетом того, что изоляция обмотки класса нагревостойкости F

$$P'_{\text{э.л1}} = 1.07 \cdot P_{\text{эл1}} \cdot \frac{2 \cdot l_{\text{л}}}{l_{\text{сп}}} = 1.07 \cdot 1.412 \cdot 10^3 \cdot \frac{2 \cdot 0.223}{0.857} = 786.34 \text{ Вт} \quad (175)$$

Тогда

$$\Delta v_{uz.n1} = 2.434 \text{ К}$$

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины определяется по [1, стр. 452]

$$\Delta v_{\text{г}} = \frac{\Sigma P'_{\text{г}}}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_{\text{г}}} = \frac{2.432 \cdot 10^3}{1.45 \cdot 23} = 72.938 \quad (176)$$

Эквивалентная поверхность охлаждения корпуса с учётом поверхности ребер станины находится по [1, стр. 453]

$$S_{\text{кор}} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (l_{\text{д}} + 2 \cdot l_{\text{выл}}) = \\ = (3.14 \cdot 0.349 + 8 \cdot 0.38) \cdot (0.205 + 2 \cdot 0.073) = 1.45 \text{ м}^2 \quad (177)$$

где  $\Pi_p$  - условный периметр поперечного сечения ребер корпуса двигателя, определяется по [1, стр. 453]

$$\Pi_p = 0.38 \text{ м}$$

Тогда

$$S_{\text{кор}} = 1.45 \text{ м}^2$$

Сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя определяется по [1, стр. 453]

$$\Sigma P'_{\text{г}} = \Sigma P' - (1 - K) \cdot (P'_{\text{э.л1}} + P_{\text{ст.осн}}) - 0.9 \cdot P_{\text{мех}} =$$

$$= 3.588 \cdot 10^3 - (1 - 0.2) \cdot (724.067 + 514.237) - 0.9 \cdot 183.864 = 2.432 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad (178)$$

где  $\Sigma P'$  - сумма всех потерь в двигателе при номинальном режиме и расчетной температуре, определяется по [1, стр. 452]

$$\begin{aligned} \Sigma P' &= \Sigma P_{ii} + (1.15 - 1) \cdot (P_{\text{э}1_{ii}} + P_{\text{э}2_{ii}}) = \\ &= 3.246 \cdot 10^3 + (1.15 - 1) \cdot (1.412 \cdot 10^3 + 869.064) = 3.588 \cdot 10^3 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (179)$$

Тогда

$$\Sigma P'_e = 2.432 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Коэффициент подогрева воздуха, учитывающий теплоотдающую способность поверхности корпуса и интенсивность перемешивания воздуха внутри машины находится по [1, стр. 450]

$$\alpha_e = 23$$

Тогда превышение температуры воздуха внутри машины над температурой окружающей среды равно

$$\Delta v_e = \frac{\Sigma P'_e}{S_{\text{кор}} \cdot \alpha_e} = \frac{2.432 \cdot 10^3}{1.45 \cdot 23} = 72.938 \text{ К} \quad (180)$$

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

$$\Delta v_1 = \Delta v_e + \Delta v'_1 = 72.938 \cdot 1.255 = 90.194 \text{ К} \quad (181)$$

Допустимое превышение температуры для класса нагревостойкости F - 100<sup>0</sup> C [1, стр. 209].

### 3. Вентиляционный расчёт

Требуемый для охлаждения расход воздуха определяется по [1, стр. 456]

$$Q_e = \frac{k_m \cdot \Sigma P'_e}{1100 \cdot \Delta v_e} = \frac{4.072 \cdot 2.432 \cdot 10^3}{1100 \cdot 72.938} = 0.123 \text{ м}^3/\text{с} \quad (182)$$

где  $k_m$  - коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором, определяется по [1, стр. 456]

$m = 1.8$  по [1, стр. 456]

$$k_m = m \cdot \sqrt{\frac{n_c \cdot (1 - s_n)}{100}} = 1.8 \cdot \sqrt{\frac{1.5 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0.023)}{100}} = 4.072 \quad (183)$$

Тогда

$$Q_e = 0.123 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расход воздуха обеспечиваемый наружным вентилятором рассчитывается по [1, стр. 456]

$$Q'_e = 0.6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n_c \cdot (1 - s_n)}{100} = 0.6 \cdot 0.349^3 \cdot \frac{1.5 \cdot 10^3 \cdot (1 - 0.023)}{100} = 0.374 \text{ м}^3/\text{с} \quad (184)$$

Так как  $Q'_e > Q_e$ , то тепловой расчёт произведён правильно.

#### 4. Механический расчёт

Асинхронный двигатель выполнен 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.

По [1] с учётом повышенной надёжности выбираем шарикоподшипник опоры I легкой серии с м. № 214 с динамической грузоподъёмностью  $C = 48000$  Н. Шарикоподшипник опоры II средней серии №314 с динамической грузоподъёмностью  $C = 80200$  Н.

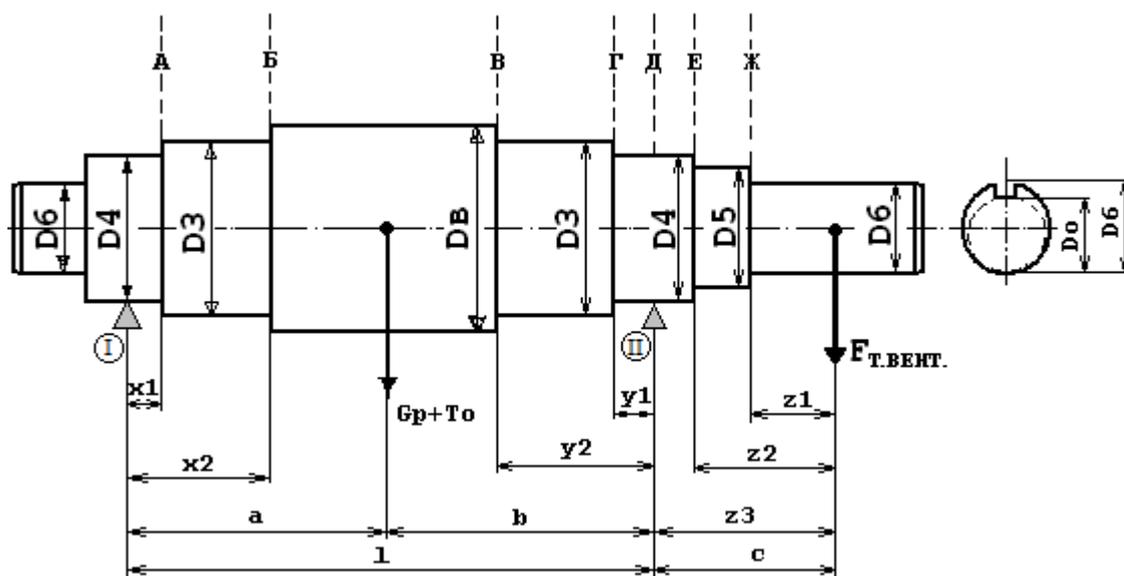


Рисунок 1.3 Конструкция вала

Диаметры ступеней выбираются например так:

Ступени диаметров должны отличаться примерно на шаг  $\Delta D$ .

Шаг  $\Delta D$  принимаем 0.004 м.

$$D3 = D6 - \Delta D.$$

$D4 = D3 - \Delta D$  (но диаметр  $D4$  должен получиться как внутренний диаметр у близко выбранного подшипника по [1, стр. 733-736], предпочтительно выбрать среднюю серию).

Если не подходит, то меняем шаг  $\Delta D$  на другое число, например 0.003, 0.005, 0.006.

Следующие ступени отличаются на шаг  $\Delta DD$ , который принимаем 0.004 м.

$$D5 = D4 - \Delta DD.$$

$D6 = D5 - \Delta DD$  (Этот диаметр  $D6$  должен получиться как диаметр выступающего конца вала который близкий выбирают по [1, стр. 740-741]).

$x_1, y_1$  = половине ширины подшипника, который предварительно выбирают по [1, стр. 733-736] по диаметру  $D_4$ . А сам  $D_4$  уже определяется после определения диаметров всех ступеней, начиная с  $D_6$ .

$$x_2 = l_{\text{выл}} + x_1 + 0.005$$

$$y_2 = l_{\text{выл}} + x_1 + 0.005$$

$z_1$  = половине длины выступающего конца вала, который уже выбрали ранее по [1, стр. 740-741]

$$z_2 = z_1 + 0.007$$

$$z_3 = z_2 + y_1$$

$$a = (l_{\delta} \cdot 0.5) + x_2$$

$$b = (l_{\delta} \cdot 0.5) + y_2$$

$$c = z_3$$

$$l = a + b$$

Предварительно принимаются следующие размеры вала:

Шаг уменьшения диаметра от внешнего до подшипника  $\Delta D = 0.005$

Шаг уменьшения диаметра от подшипника до выступающего конца вала  $\Delta DD = 0.005$

$$D_6 = 0.08$$

$$D_3 = D_6 - \Delta D, D_3 = 0.075 \text{ м,}$$

$$D_4 = D_3 - \Delta D, D_4 = 0.070 \text{ м, принимаем под подшипник по [1, стр. 733-736]}$$

$$D_5 = D_4 - \Delta DD, D_5 = 0.065 \text{ м,}$$

$$D_6 = D_5 - \Delta DD, D_6 = 0.06 \text{ м, принимаем под конец вала по [1, стр. 740-741]}$$

$$D_o = D_6 - 0.003, D_o = 0.057 \text{ м,}$$

Для выбранного подшипника его половина ширины ( $B/2$  по 1, стр. 733-736)

$$x_1 = 12 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

Для выбранного подшипника его половина ширины ( $B/2$  по 1, стр. 733-736)

$$y_1 = 17.5 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

$$x_2 = l_{\text{выл}} + x_1 + 0.005 = 0.073 + 0.012 + 0.005 = 0.090 \text{ м,}$$

$$y_2 = l_{\text{ввл}} + y_1 + 0.005 = 0.073 + 0.018 + 0.005 = 0.095 \text{ м},$$

Половина длины выступающего конца вала из [1, стр. 740-741]

$$z_1 = 70 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$z_2 = z_1 + 0.007 = 70 \cdot 10^{-3} + 0.007 = 0.077 \text{ м},$$

$$z_3 = z_2 + y_1 = 0.077 + 0.018 = 0.095 \text{ м},$$

$$a = 0.5 \cdot l_{\delta} + x_2 = 0.5 \cdot 0.205 + 0.09 = 0.192 \text{ м},$$

$$b = 0.5 \cdot l_{\delta} + y_2 = 0.5 \cdot 0.205 + 0.095 = 0.198 \text{ м},$$

$$c = z_3 = 0.095 \text{ м},$$

$$l = a + b = 0.192 + 0.198 = 0.39 \text{ м}.$$

#### 4.1 Расчет вала на жесткость

Для асинхронных двигателей приближённое значение силы тяжести определяется по [1, стр. 244]

$$G_p = 9.81 \cdot m_p = 9.81 \cdot 67.984 = 666.924 \text{ Н} \quad (185)$$

где  $m_p$  - масса ротора двигателя находится по [1, стр. 244]

$$m_p = 6500 \cdot (D_2)^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot (0.226)^2 \cdot 0.205 = 67.984 \text{ кг} \quad (186)$$

Тогда

$$G_p = 666.924 \text{ Н}$$

Прогиб вала посередине сердечника ротора под действием силы тяжести определяется по [1, стр. 245]

$$\begin{aligned} f_G &= \frac{G_p}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot (a^2 \cdot S_a + b^2 \cdot S_a) = \\ &= \frac{666.924}{3 \cdot 2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.39^2} \cdot (0.192^2 \cdot 3.589 \cdot 10^3 + 0.198 \cdot 3.589 \cdot 10^3) = 2.023 \cdot 10^{-6} \text{ м} \end{aligned} \quad (187)$$

Модуль Юнга для стали равен по [1, стр. 246]

$$E = 2.06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

Момент инерции участка вала для сплошного вала находится по [1, стр. 246]

$$J_1 = \frac{\pi \cdot D_4^4}{64} = \frac{3.14 \cdot 0.070^4}{64} = 1.179 \cdot 10^{-6} \quad (188)$$

$$J_2 = \frac{\pi \cdot D_3^4}{64} = \frac{3.14 \cdot 0.075^4}{64} = 1.576 \cdot 10^{-6} \quad (189)$$

$$J_3 = \frac{\pi \cdot D_6^4}{64} = \frac{3.14 \cdot 0.08^4}{64} = 2.038 \cdot 10^{-6} \quad (190)$$

Для асинхронного двигателя с достаточным приближением можно принять по [1, стр. 246]

$$\begin{aligned} S_a &= \left( \frac{a^3 - x_2^3}{J_3} \right) + \left( \frac{x_2^3 - x_1^3}{J_2} \right) + \left( \frac{x_1^3 - 0}{J_1} \right) = \\ &= \left( \frac{0.192^3 - 0.09^3}{2.038 \cdot 10^{-6}} \right) + \left( \frac{0.09^3 - 0.012^3}{1.576 \cdot 10^{-6}} \right) + \left( \frac{0.012^3 - 0}{1.179 \cdot 10^{-6}} \right) = 3.589 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1} \end{aligned} \quad (191)$$

$$\begin{aligned} S_b &= \left( \frac{b^3 - y_2^3}{J_3} \right) + \left( \frac{y_2^3 - y_1^3}{J_2} \right) + \left( \frac{y_1^3 - 0}{J_1} \right) = \\ &= \left( \frac{0.198^3 - 0.095^3}{2.038 \cdot 10^{-6}} \right) + \left( \frac{0.095^3 - 0.018^3}{1.576 \cdot 10^{-6}} \right) + \left( \frac{0.018^3 - 0}{1.179 \cdot 10^{-6}} \right) = 3.918 \cdot 10^3 \text{ м}^{-2} \end{aligned} \quad (192)$$

$$\begin{aligned} S_b &= \left( \frac{b^2 - y_2^2}{J_3} \right) + \left( \frac{y_2^2 - y_1^2}{J_2} \right) + \left( \frac{y_1^2 - 0}{J_1} \right) = \\ &= \left( \frac{0.198^2 - 0.095^2}{2.038 \cdot 10^{-6}} \right) + \left( \frac{0.095^2 - 0.018^2}{1.576 \cdot 10^{-6}} \right) + \left( \frac{0.018^2 - 0}{1.179 \cdot 10^{-6}} \right) = 2.055 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1} \end{aligned} \quad (193)$$

Номинальный вращающий момент определяется по [1, стр. 246]

$$M_2 = \frac{9.55 \cdot P_2}{n_c \cdot (1 - s_n)} = \frac{9.55 \cdot 3.7 \cdot 10^4}{1500 \cdot (1 - 0.0225)} = 240.99 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (194)$$

Коэффициент передачи по [1, стр. 246]:

$$k_p = 0.3$$

Радиус соединительной муфты

$$R = 80 \cdot 10^{-3}$$

Поперечная сила, приложенная к выступающему концу вала:

$$F_n = k_p \cdot \frac{M_2}{R} = 0.3 \cdot \frac{240.99}{80 \cdot 10^{-3}} = 903.708 \quad (195)$$

Прогиб вала посередине сердечника ротора будет определяться по [1, стр. 246]

$$f_n = \frac{F_n \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot [(1.5 \cdot l \cdot S_o - S_b) \cdot a + b \cdot S_a] =$$

$$\frac{903.708 \cdot 0.095}{3 \cdot 2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0.39^2} \cdot [(1.5 \cdot 0.39 \cdot 2.1 \cdot 10^4 - 3.918 \cdot 10^3) \cdot 0.192 + 0.198 \cdot 3.6 \cdot 10^3] = 2.1 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$(196)$$

Первоначальное смещение ротора принимается равным по [1, стр. 247]

$$e_0 = 0.1 \cdot \delta + f_n + f_G = 0.1 \cdot 6.144 \cdot 10^{-4} + 2.1 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-6} = 6.552 \cdot 10^{-5} \text{ м}$$

$$(197)$$

Сила одностороннего магнитного напряжения, вызванная смещением ротора на  $e_0$  определяются по [1, стр. 247]

$$T_0 = 2.94 \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot \frac{e_0}{\delta} \cdot 10^5 = 2.94 \cdot 0.226 \cdot 0.205 \cdot \frac{6.552 \cdot 10^{-5}}{6.144 \cdot 10^{-4}} = 1.45 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

$$(198)$$

Прогиб вала под действием одностороннего магнитного напряжения, пропорционален прогибу под действием силы тяжести и определяется по [1, стр. 247]

$$f_T = \frac{f_G \cdot T_0}{G_p} = \frac{2.02 \cdot 10^{-6} \cdot 1.45 \cdot 10^3}{666.924} = 4.41 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$(199)$$

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

$$f_M = \frac{f_T}{1 - \frac{f_T}{e_0}} = \frac{4.41 \cdot 10^{-6}}{1 - \frac{4.41 \cdot 10^{-6}}{6.552 \cdot 10^{-5}}} = 4.73 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$(200)$$

Результирующий прогиб вала под действием начальной силы магнитного притяжения, реакции передачи и тяжести ротора определяется по [1, стр. 247]

$$f = f_G + f_n + f_M = 2.02 \cdot 10^{-6} + 2.06 \cdot 10^{-6} + 4.728 \cdot 10^{-6} = 8.81 \cdot 10^{-6} \text{ м} \quad (201)$$

Результирующий прогиб вала не должен превышать 10% от воздушного зазора согласно [1, стр. 247]

$$X = \frac{f \cdot 100}{\delta} = \frac{8.81 \cdot 10^{-6} \cdot 100}{6.144 \cdot 10^{-4}} = 1.434 \% \quad (202)$$

#### 4.2 Определение критической частоты вращения

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

$$n_{кр} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{f_T}{e_0}}{f_G}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{4.41 \cdot 10^{-6}}{6.552 \cdot 10^{-5}}}{2.02 \cdot 10^{-6}}} = 20368 \text{ об./мин.} \quad (203)$$

Согласно [1, стр. 248] должно выполняться следующее условие

$$n_{кр} > 1.3 \cdot n_c \cdot (1 - s_n)$$

$$\text{где } n_c \cdot (1 - s_n) \cdot 1.3 = 1.906 \cdot 10^3 \text{ об./мин.} \quad (204)$$

Тогда как видно из неравенства требуемое условие выполняется

$$20368 > 1.906 \cdot 10^3$$

Расчёт вала на прочность.

Коэффициент перегрузки по [1, стр. 247]

$$k = 2.5$$

Коэффициент по [1, стр. 247]

$$M_n = M_2 = 240.989$$

Нагрузка от установившегося магнитного втяжения:

$$T = \frac{T_0}{1 - \frac{f_T}{e_0}} = \frac{1 \cdot 10^3}{1 - \frac{4.41 \cdot 10^{-6}}{6.552 \cdot 10^{-5}}} = 1.558 \cdot 10^3 \quad (205)$$

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

$$WA = 0.1 \cdot D4^3 = 0.1 \cdot 0.07^3 = 3.43 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad (206)$$

Изгибающий момент для участка А

$$\begin{aligned} MuA &= \left[ k \cdot F_n \cdot c + (G_p + T) \cdot b \right] \cdot \frac{x1}{l} = \\ &= \left[ 2.5 \cdot 903.708 \cdot 0.095 + (666.924 + 1.558 \cdot 10^3) \cdot 0.198 \right] \cdot \frac{0.012}{0.39} = 20.11 \text{ Н}\cdot\text{м} \end{aligned} \quad (207)$$

Напряжение в сечении А определяем по формуле

$$\begin{aligned} \sigma A &= \left( \frac{1}{WA} \right) \cdot \sqrt{MuA^2 + (k \cdot \alpha \cdot Mn)^2} = \\ &= \left( \frac{1}{3.43 \cdot 10^{-5}} \right) \cdot \sqrt{20.11^2 + (2.5 \cdot 0.6 \cdot 240.989)^2} = 1.056 \cdot 10^7 \text{ Па} \end{aligned} \quad (208)$$

где  $k$  - коэффициент перегрузки принимается исходя из пусковых характеристик и равен значению относительного пускового момента

$$k = 2.5$$

$\alpha$  - коэффициент для реверсивных машин по [1, стр. 249] принимается равным

$$\alpha = 0.6$$

Аналогично для остальных участков:

Участок Б

$$WB = 0.1 \cdot D3^3 = 4.264 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 \quad (209)$$

$$MuB = \left[ k \cdot F_n \cdot c + (G_p + T) \cdot b \right] \cdot \frac{x2}{l} = 149.991 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (210)$$

$$\sigma B = \left( \frac{1}{WB} \right) \cdot \sqrt{MuB^2 + (k \cdot \alpha \cdot Mn)^2} = 9.177 \cdot 10^6 \text{ Па} \quad (211)$$

Участок В

$$WB = 0.1 \cdot D3^3 = 4.264 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$MuB = k \cdot F_n \cdot c \cdot \left( 1 - \frac{y2}{l} \right) + (G_p + T) \cdot \frac{\alpha \cdot y2}{l} = 486.76 \text{ Н}\cdot\text{м} \quad (212)$$

$$\sigma_B = \left( \frac{1}{WB} \right) \cdot \sqrt{MuB^2 + (k \cdot \alpha \cdot Mn)^2} = 1.422 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Участок Г

$$WB = 0.1 \cdot D4^3 = 3.43 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$Mu\Gamma = k \cdot F_n \cdot c \cdot \left( 1 - \frac{y1}{l} \right) + (G_p + T) \cdot \frac{\alpha \cdot y1}{l} = 263.837 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\sigma_\Gamma = \left( \frac{1}{W\Gamma} \right) \cdot \sqrt{Mu\Gamma^2 + (k \cdot \alpha \cdot Mn)^2} = 1.305 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Участок Д

$$WD = 0.1 \cdot D4^3 = 3.43 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$MuD = k \cdot F_n \cdot z3 = 213.501 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\sigma_D = \left( \frac{1}{WD} \right) \cdot \sqrt{MuD^2 + (k \cdot \alpha \cdot Mn)^2} = 1.224 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Участок Е

$$WE = 0.1 \cdot D5^3 = 2.746 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$MuE = k \cdot F_n \cdot z2 = 173.964 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\sigma_E = \left( \frac{1}{WE} \right) \cdot \sqrt{MuE^2 + (k \cdot \alpha \cdot Mn)^2} = 1.461 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Участок Ж

$$WЖ = 0.1 \cdot D\sigma^3 = 1.852 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3$$

$$MuЖ = k \cdot F_n \cdot z2 = 158.149 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

$$\sigma_{Ж} = \left( \frac{1}{WЖ} \right) \cdot \sqrt{MuЖ^2 + (k \cdot \alpha \cdot Mn)^2} = 2.131 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

Согласно [1, стр. 250] расчетное значение эквивалентного сопротивления при изгибе и кручении не должно превышать 0.7 предела текучести. Последний может быть определен также по [1, стр. 250]

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

$$0.7 \cdot \sigma_{np} = 2.52 \cdot 10^8 \text{ Па} \tag{213}$$

Должно соблюдаться неравенство:

$$\sigma_{эжв} < 0.7 \cdot \sigma_{пр}$$

$$2.131 \cdot 10^7 < 2.52 \cdot 10^8$$

Самым нагруженным участком оказался участок Ж, тогда:

$$\sigma_{эжв} = (\sigma_{Ж}) = 2.131 \cdot 10^7 \quad (214)$$

$$2.131 \cdot 10^7 < 2.52 \cdot 10^8$$

Как видно из неравенства требуемое условие выполняется.

При диаметре вала 70 мм согласно рекомендациям [1, стр. 254] по таблице П 5.1 выбираем шарикоподшипник легкой серии №214 для начала вала, на конец вала выбираем шарикоподшипник средней серии №314.

## Заключение

В электромагнитном расчёте содержатся вопросы по расчёту параметров, энергетических и пусковых характеристик двигателя. Для статора выбрана двухслойная петлевая обмотка с числом параллельных ветвей  $\alpha=1$ , диаметр обмоточного провода  $d_{из} = 1.785$  мм и изоляция класса нагревостойкости F. Укладка обмотки в пазы статора производится ручным способом. Пазы на статоре имеют трапецеидальную форму. Статор собирается из листов электротехнической стали марки 2212 толщиной 0.5 мм. Пазы на роторе закрытые, имеют овальную форму. Коэффициент полезного действия = 92%, коэффициент мощности = 0.85. Тепловой расчёт включает в себя определение превышения температуры обмотки статора над температурой окружающей среды, которая равна.

В разделе выбора главных размеров двигателя было рассчитано электромагнитных нагрузки, анализ показывает, что у выполненного асинхронного двигателя общего назначения отношение  $\lambda$  изменяется в достаточно узких пределах.

В разделе расчёт площадей поперечного сечения рассчитаны количество число пазов статора, зубцовое деление статора, число эффективных проводников в пазу и т.п. по данным можно рассмотреть что индукция в воздушном зазоре и плотность тока в обмотке статора пределах допустимых.

Расчёт размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора определены размеры зубцов и коэффициент заполнения паза находится в допустимом диапазоне.

При расчёте ротора как и у статора воздушный зазор и число пазов, размеры паза рассчитаны и находится в допустимом диапазоне.

Расчёт магнитной цепи, полученные значения намагничивающего тока и коэффициента насыщения характерны для специализированных двигателей, что объясняется увеличенным по сравнению с двигателями

общепромышленного назначения воздушным зазором и отсутствием насыщения в зубцах статора и ротора.

Метод расчёта характеристик базировались на системе уравнения тока и напряжения асинхронного машины параметрах рабочего режима полезная (отдаваемая) мощность, подводимое напряжение, коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитаны правильно.

Потери в асинхронных машина подразделены на потери в стали (основные и добавочные).

В вентиляционном расчёте определялся расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором, необходимого для охлаждения двигателя.

Заданием на проектирование предусмотрен расчёт вала на жёсткость и прочность. Было произведено конструирование узлов и деталей двигателя.

В технологической части был проведен анализ конструкции на технологичность, а также произведен расчёт размерных цепей методом полной взаимозаменяемостью, расчёт норм времени и программы выпуска асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

Разработана маршрутная технология процесса сборки асинхронного двигателя и выбрано требуемое оборудование. Разработанный технологический процесс удовлетворяет нормам и техническому заданию. Разработка технологического процесса велась с учетом требований техники безопасности, экономической эффективности и требований предъявленных к качеству изделия.

Экономическая часть выпускной квалификационной работы была представлена с целью оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения инженерных решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Рассчитывалась себестоимость технологического процесса производства двигателя.

Производство данного типа двигателя при поддержании уровня продаж на уровне производства в 11500 шт./год можно считать прибыльным.

Рентабельность данной продукции составляет 55%, это говорит о том, что продукт имеет высокую эффективность для производителя, а при объёме продукции 4037 шт./год производство будет безубыточно, годовая экономия электроэнергии при эксплуатации проектируемого двигателя составила в условиях 2-х сменной работы более 2 тыс. кВт·час.

В разделе социальной ответственности был проведён анализ вредных и опасных факторов, рассмотрены разделы пожарной безопасности, производственной санитарии, микроклимат и охрана окружающей среды.

Произведен расчёт освещения цеха. Также были рассмотрены разделы техники безопасности, в которых прописаны действия рабочего в различных чрезвычайных ситуациях.

Таким образом, в результате проделанной работы был спроектирован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, удовлетворяющий современным требованиям, предъявляемым к асинхронным двигателям и который может быть принят к выпуску на современном производстве.

## Список используемых источников

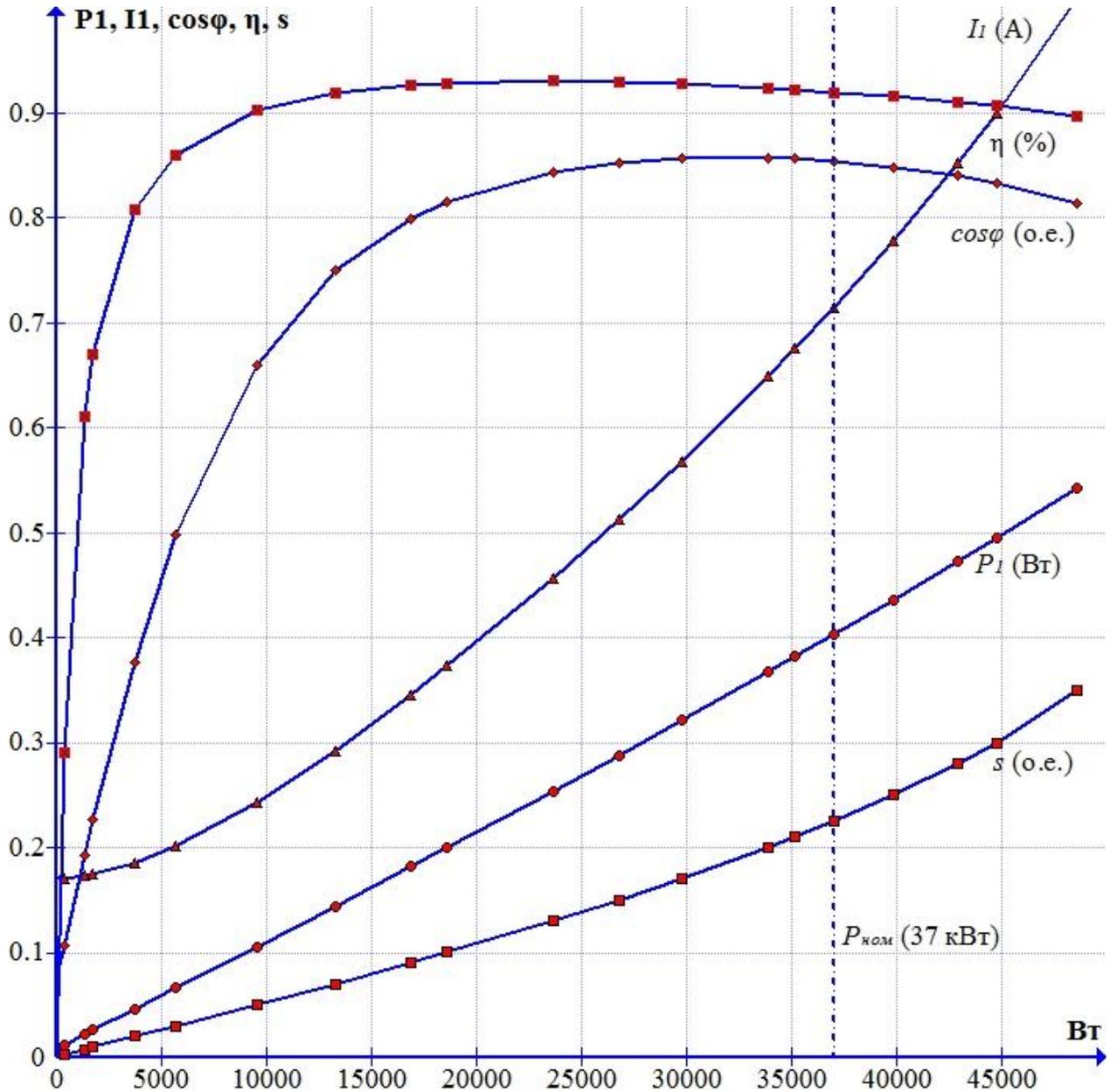
1. Проектирование электрических машин. / Копылов И.П. и др. М: Энергия, 2012 - 767 с.;
2. Гурин Я.С., Кузнецов Б.И., Проектирование серий электрических машин, М: Энергия, 1978 - 480 с.;
3. Асинхронные двигатели серии 4А: справочник. / Кравчик А.Э. и др. М: Энергоатомиздат, 1982 - 504 с.;
4. Брускин Д.Э. и др., Электрические машины, Ч. 1, М: Высш. шк., 1987 - 319 с.;
5. Методические указания по конструированию асинхронных двигателей. Томск. Изд. ТПУ, 1996 - 40 с.;
6. Методические указания по расчетам асинхронных двигателей. Томск. Изд. ТПУ 1996 - 54 с.;
7. Методические указания по выбору основных параметров асинхронных двигателей. Томск. Изд. ТПУ 1997 - 36 с.;
8. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Серийное и крупносерийное производство. М.: Машиностроение, 1985 - 496 с.;
9. Планирование на предприятии: Учебное пособие для вузов / Ильин А.И. - 2-е изд., перераб. Минск: Новое знание, 2001 - 634 с.:ил.;
10. Фатхудинов Р.А. Производственный менеджмент. 203 - 491 стр.:ил, 4-е издание;
11. ГК ПРАКТИК URL: <http://pr52.ru>, СЗЭМО URL: <http://www.szemo.ru>, UZTELMASH URL: <http://uztelmash.gl.uz/>, ХАРДМОТОРС URL: <http://hardmotors.by/>;
12. ГК ПРАКТИК // Официальный сайт ГК ПРАКТИК. URL: <http://pr52.ru>, дата обращения: 16.05.2016 г.;
13. Средняя цена на двигатель: <http://www.etm.ru/cat/nn/821720/#>;
14. Курс лекций по энергосбережению. Чувашский государственный университет им. Ульянова И.Н.. Чебоксары 2005 г. 25 - 30 стр.;

15. ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ. Защитное заземление, зануление;
16. ГОСТ 12.2.007.3-75 ССБТ. Электротехнические устройства на напряжение свыше 1000 В. Требования безопасности;
17. ГОСТ 12.3.019-80 ССБТ. Испытания и измерения электрические. Общие требования безопасности;
18. ГОСТ 12.2.022-80 ССБТ. Конвейеры. Общие требования безопасности;
19. ГОСТ 12.4.016-83 ССБТ. Одежда специальная защитная. Номенклатура показателей качества;
20. СН 245-71 Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий;
21. ГОСТ 12.4.021-75 ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования;
22. ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности
23. Федосова В.Д. Расчёт искусственного освещения. Методическое указание - Томск. ТПУ, 1991 - 16 с;
24. Безопасность жизнедеятельности: Учебник для вузов / Белов С.В., Ильницкая А.В., Козьяков А.Ф. и др.: Под общей ред. С.В. Белова. М.: Высшая школа, 1999. - 448 с.;
25. ОНТП 24-86 Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности.

## Приложение А

Рабочие характеристики спроектированного двигателя

$P_{ном} = 37 \text{ кВт}$ ,  $2 \cdot p = 4$ ,  $U_{ном} = 220 / 380 \text{ В}$ ,  $I_{1ном} = 71.476 \text{ А}$ ,  $\cos \varphi = 0.853 \text{ о.е.}$ ,  
 $\eta_H = 0.919\%$ ,  $s_H = 0.0225 \text{ о.е.}$ .

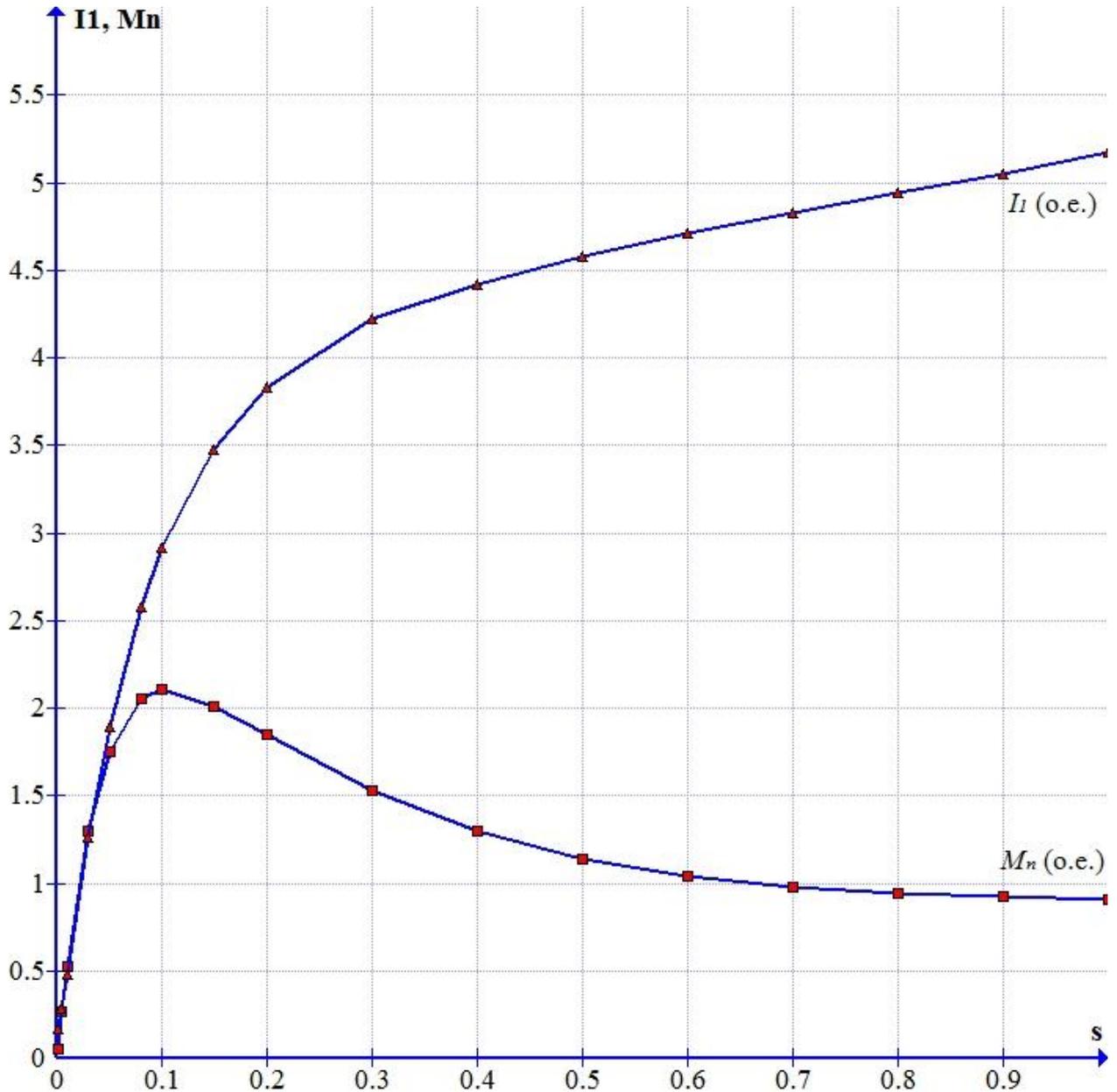


## Приложение Е

Пусковые характеристики спроектированного двигателя

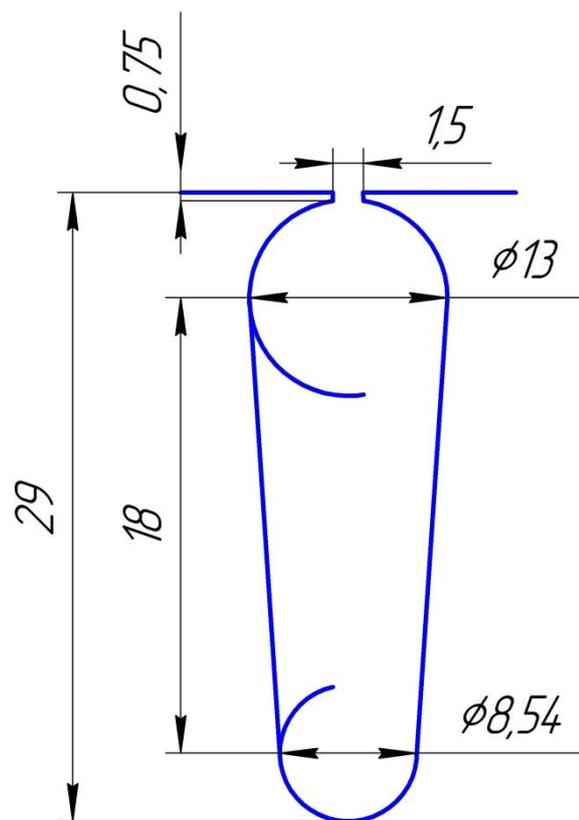
$P_{ном} = 37$  кВт,  $2 \cdot p = 4$ ,  $U_{ном} = 220/380$  В,  $M_{n_j} = 0.91$  о.е.,  $M_{n.max} = 2.107$  о.е.,

$I_1 = 5.17$  о.е..



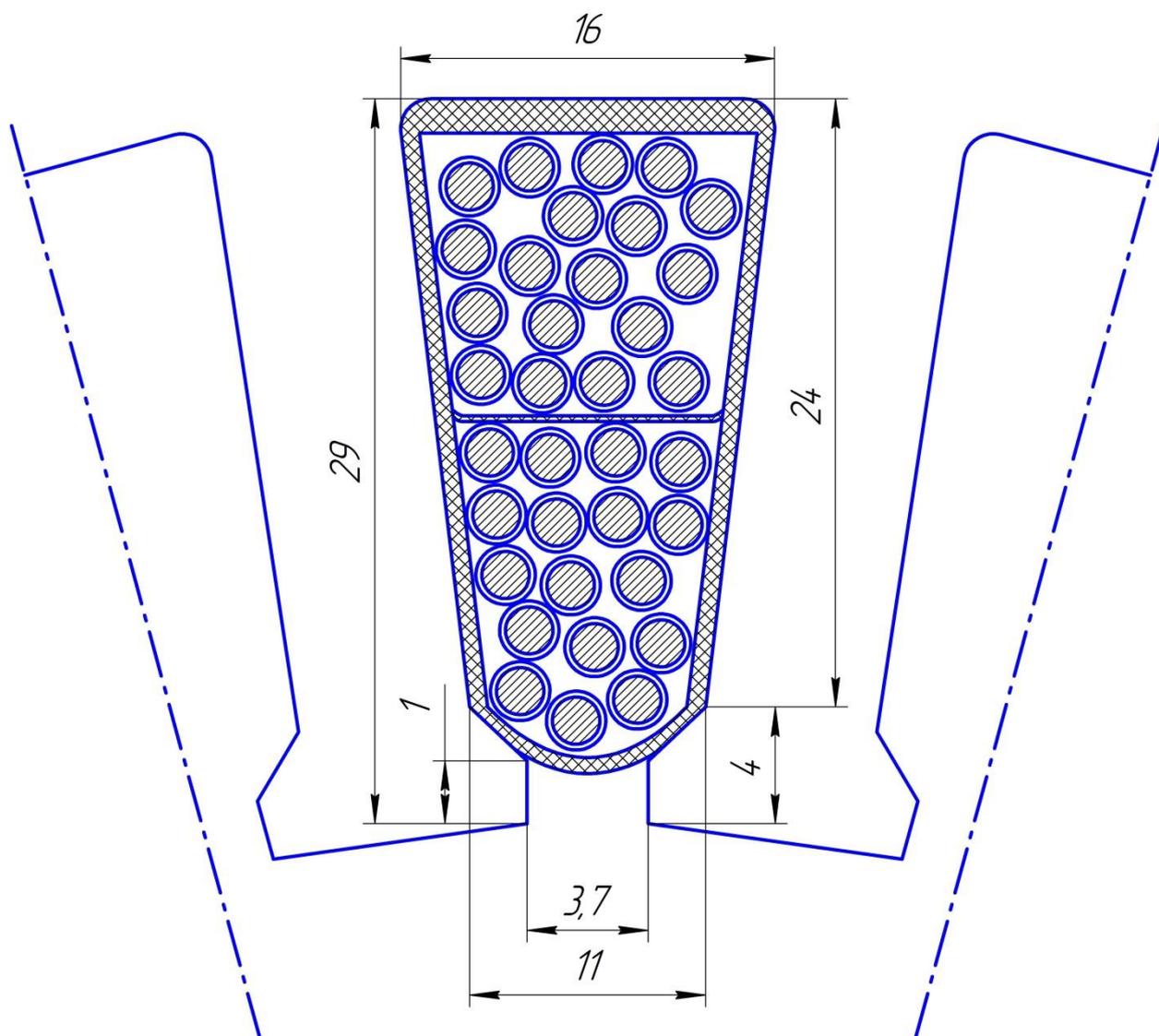
## Приложение В

Эскиз паза ротора в штампе, размеры в мм



# Приложение Г

Эскиз паза статора в штампе с заполнением, размеры в мм.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

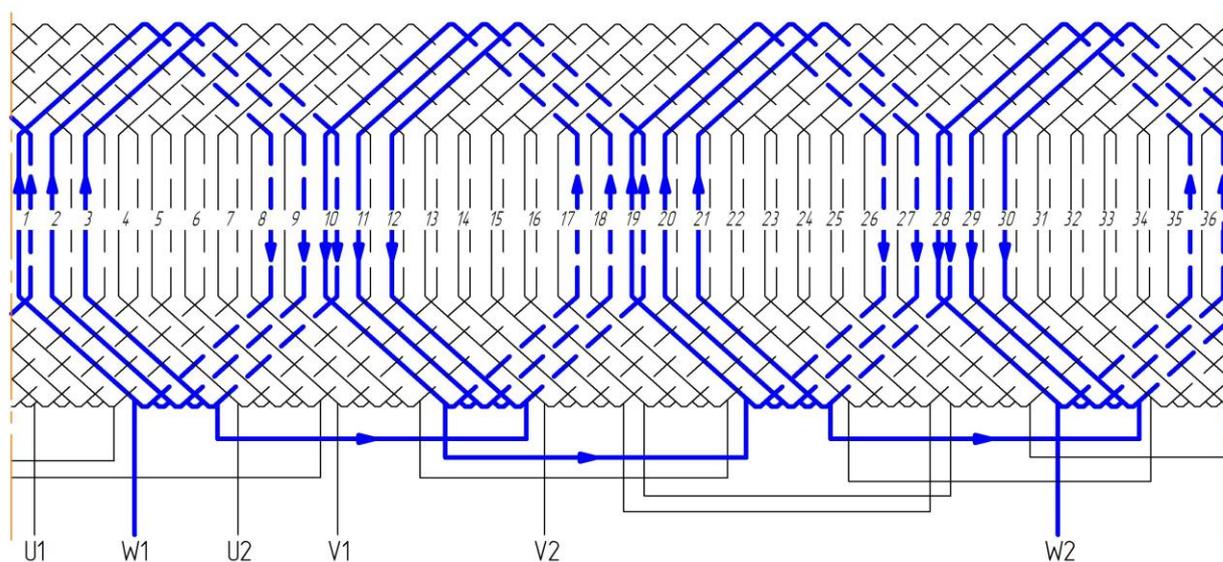


Схема двухслойной петлевой обмотки с укороченным шагом:  $Z=36$ ,  $2p=4$ ,  
 $\alpha=1$ ,  $y=7$