

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Политехнический институт
Факультет «Энергетический»
Кафедра «Теоретические основы электротехники»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ С.А. Ганджа
_____ 2019 г.

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПРИВОДА ПИЛЬГЕРСТАНА ДЛЯ
ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БЕСШОВНЫХ ТРУБ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 13.03.02.2019.171. ПЗ ВКР

Руководитель работы,
зав.кафедрой д.т.н.,
_____ С.А. Ганджа
_____ 2019 г.

Автор работы
студент группы П-473
_____ А.В. Кик
_____ 2019 г.

Нормоконтроллер, зав.кафедрой
д.т.н.,
_____ С.А. Ганджа
_____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Кик А.В. Разработка электродвигателя привода пильгерстана для производства бесшовных труб. – Челябинск: ЮУрГУ, Политехнический институт, Энергетический; 2019, 75 с., 38 ил., 2 табл., библиогр. список – 18 наим.

Целью выпускной квалификационной работы является выбор оптимального варианта электродвигателя для привода Пилгерстана, выпускающего бесшовные трубы большого диаметра.

Заказчиком данного проекта является Челябинский трубопрокатный завод(ЧТПЗ)

Представлены четыре группы вариантов: использование высокоскоростного электродвигателя с редуктором, использование низкоскоростного электродвигателя без редуктора, заменяющего существующий электродвигатель, использование маховика в качестве ротора нового электродвигателя, исключая маховик и заменив его двигателем с эквивалентной инерционной массой. Были рассмотрены все плюсы и минусы каждого из вариантов. Для выбранной опции использовалась программа точного расчета электрических машин на основе метода конечных элементов ANSYS Electronics Desktop. Минимальный расход активных материалов и энергетические показатели были выбраны в качестве показателей наилучшего варианта. Для замены существующего морально и физически устаревшего коллекторного электродвигателя постоянного тока коллектора был предложен привод на основе асинхронного двигателя большого диаметра, который имеет более высокую надежность благодаря бесконтактному токоподводу, двигатель имеет закрытую конструкцию, которая снижает шум, повышает безопасность и надежность.

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подп.</i>	<i>Дата</i>	<i>Разработка электродвигателя привода пильгерстана для технологии изготовления бесшовных труб</i>	<i>Лит</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Разраб.</i>	<i>Кик</i>						3	75
<i>Провер.</i>	<i>Ганджа</i>					<i>ЮУрГУ</i>		
<i>Н.контр</i>	<i>Ганджа</i>					<i>Кафедра ТОЭ</i>		
<i>Утв.</i>	<i>Ганджа</i>							

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	12
1.1 Высокоскоростной асинхронный двигатель 2570 кВт	13
1.2 Замена существующего двигателя постоянного тока асинхронным двигателем 2570 кВт	14
1.3 Замена существующего двигателя постоянного тока синхронным двигателем 2570 кВт.	15
1.4 Встраивание нового двигателя в маховик.....	17
1.4.1 Радиальный асинхронный двигатель 2570 кВт	17
1.4.2 Торцевой асинхронный двигатель 2570 кВт.....	18
1.5 Исключение маховика и замена его двигателем большого диаметра с эквивалентной инерционной массой.....	19
1.5.1 Синхронный двигатель с когтеобразными полюсами с постоянными магнитами 1375 кВт.....	20
1.5.2 Асинхронный двигатель 1375 кВт	21
2.ОСОБЕННОСТИ АСИНХРОННЫХ МАШИН.....	23
2.1 Устройство трехфазного асинхронного двигателя.....	23
2.2. Вращающееся магнитное поле статора асинхронного двигателя.....	25
2.3. Принцип действия асинхронного двигателя.....	27
2.4 Свойство саморегулирования вращающего момента асинхронного двигателя.....	28
3.ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ БАЗОВОГО ВАРИАНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ.....	30

3.1.Выбор главных размеров	30
3.2 Определение Z_1 , W_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора	32
3.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора	35
3.4 Расчет ротора.....	40
3.5 Расчет магнитной цепи.....	44
3.6 Параметры рабочего режима	48
3.7 Расчет потерь.....	54
3.8 Расчет рабочих характеристик	57
4 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА.....	61
4.1 Моделирование двигателя в программной среде Ansys Electronics Desktop	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	72
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	73

ВВЕДЕНИЕ

Трубопрокатное производство является важной отраслью в России. Без труб невозможно обеспечить удовлетворение потребностей человека, поэтому совершенствование технологии производства труб является очень актуальной задачей для Российской Федерации. Трубы используются как для транспортировки веществ в промышленных масштабах, так и для бытового жизнеобеспечения. Самые распространенные стальные трубы. Стальные трубы можно разделить на бесшовные и сварные.

Бесшовные трубы используются в нефтегазовой промышленности, которая является ключевым сектором экономики страны; для трубопроводов, для строительства, для машиностроения, для сосудов и баллонов.

Одним из методов изготовления бесшовных труб является пилигримовый метод. Обсадные, буровые, нефтепроводные и трубы общего назначения диаметром до 720 мм изготавливаются на трубопрокатных агрегатах (ТПА).

Пилигримовые станы (пилгерстаны) - двухвалковые трубопрокатные станы для периодической прокатки труб в валках переменного калибра. Конструкция пилигримового стана представляет собой двухвалковую подставку с калибром переменного сечения и механизмом подачи. Валки вращаются в направлении, противоположном заготовке. Металл обжат в калибре переменного сечения только на пол-оборота валков. пилигримовый метод является одним из наиболее экономичных и универсальных методов производства бесшовных труб, так как переход на трубы другого размера в пилгерстане занимает гораздо меньше времени, чем, например, на непрерывном многоклетьевом стане

Преимущества пилигримного метода прокатки труб также заключаются в возможности изготовления труб из слитков, производства специальных толстостенных и фасонных труб специального назначения: квадратные, шестигранные, конические, ступенчатые, плавниковые и т. д.; производство труб значительной длины; высокой степени механизации и автоматизации процессов, их низкая стоимость.

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	Лист
						6
Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

Поэтому, несмотря на потребность в новых технологиях прокатки, производство труб на пилигримовых агрегатах остается одним из наиболее перспективных в мире для производства горячекатаных труб широкого диапазона размеров и марок стали. Эта технология в настоящее время уникальна.

В мире насчитывается около 50 агрегатов с пилигримовой технологией. В России эксплуатируются четыре агрегата, один из которых расположен на Челябинском трубопрокатном заводе, который является крупным производителем бесшовных труб.

Технология изготовления бесшовных труб, как и любая другая технология, требует использования надежного высококачественного технологического оборудования.

Целью данного дипломного проекта является разработка электродвигателя для модернизации электропривода пилигримового стана, установленного на Челябинском трубопрокатном заводе (ЧТПЗ), крупного производителя бесшовных труб. ЧТПЗ является заказчиком проекта и индустриальным партнером.

Существующий электропривод пильгерстана построен на базе двигателя постоянного тока 1928 г. выпуска, мощность двигателя составляет 2570 кВт. Из-за морального и технического износа привода его необходимо заменить на современный электропривод.

В настоящее время на Челябинском трубопрокатном заводе в качестве двигателя привода стана используется коллекторный двигатель постоянного тока Siemens GM 900/100 со следующими основными параметрами: номинальная мощность 2,75 МВт, номинальное напряжение питания 6 кВ постоянного тока, номинальная скорость 35-40 об. / мин. Двигатель вращает маховик диаметром 9 м с большой инерционной массой 120 тонн. Привод работает параллельно двум цехам по производству бесшовных труб.

На рисунке 1. представлен нынешний привод пильгерстана

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм/Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			7



Рис.1. Привод пильгерстана.

На рисунке 1 представлен план размещения привода

Основная функция двигателя – раскручивание массивного маховика, и дальнейшее поддержание постоянной скорости его вращения

На рисунке 2 представлен план размещения привода

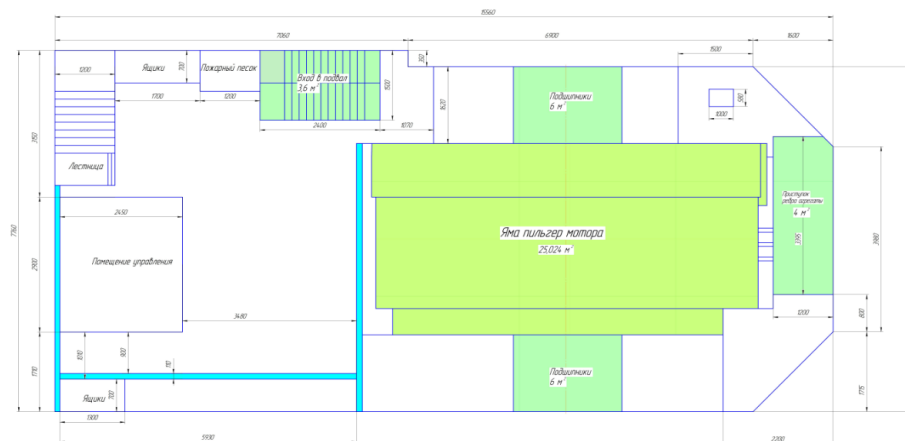


Рис.2. План размещения привода.

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

8

В таблице 1 показаны параметры электродвигателя

Таблица 1 – Параметры электродвигателя

Параметр	Значение
Мощность, кВт	2 750
Напряжение якоря, В	700
Ток якоря, А	4 000
Частота вращения, об/мин	35-75
Напряжение возбуждения, В	500
Ток возбуждения, А	90
Класс изоляции обмоток	F
Наружный диаметр сердечника якоря, мм	4 100
Диаметр коллектора по рабочей части, мм	2 992±2
Длина вала якоря, мм	8 470
Длина сердечника якоря, мм	1 100
Вылет лобовых частей обмотки якоря со стороны коллектора и со стороны маховика, мм	332,5±2
Количество пазов якоря, штук	396
Количество секций обмотки якоря, штук	396
Количество уравнивателей, штук	22
Количество коллекторных пластин, штук	1 584
Масса коллектора, кг	4 900
Масса меди коллекторной, кг	1 610
Масса конуса нажимного, кг	520
Масса цилиндра корпуса коллектора, кг	920

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата
----------	----------	---------	------

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

9

Существующий электропривод пыльгерстана полностью функционален и полностью соответствует предъявляемым к нему требованиям, но технический и моральный износ привода, который эксплуатируется с 1928 года, требует его замены на основе современных приводов. Необходимо заменить существующий привод постоянного тока пыльгерстана на аналогичный по мощности и другим параметрам привода.

К новому приводу руководством предприятия были сформулированы следующие основные требования:

- привод должен соответствовать размерам помещения, в котором находится существующий блок (см. рис.2);
- для повышения надежности и снижения эксплуатационных расходов привод должен иметь бесконтактный токоподвод;
- Привод должен иметь возможность регулировать скорость в диапазоне 30-45 об / мин.;
- желательно разделить существующий привод, который работает одновременно на два параллельных цеха, на два независимых привода. В то же время, техническое обслуживание и ремонтные работы будут упрощены.;
- система управления нового привода должна использовать новейшие компьютерные технологии (облачные технологии удаленного управления с контролем и фиксацией всех необходимых технико-экономических параметров)
- необходимо повысить удельные энергетические показатели привода, такие как КПД и коэффициент мощности;
- Необходимо предусмотреть минимальный период для демонтажа старого привода и замены его новым. В течение длительного времени прерывать существующую производственную линию недопустимо.

Исходя из требований заказчика проекта для диплома можно сформулировать следующее техническое задание

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

- 1.Сделать предварительный обзор всех возможных вариантов для замены существующего морально и физически устаревшего коллекторного электродвигателя постоянного тока коллектора
- 2.Выбрать базовый вариант
- 3.Сделать электромагнитный расчет базового варианта с параметрами определенными заказчиком,
- 4.разработать конструкцию
- 5.сделать анализ в ANSYS Electronics Desktop.

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

1 ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ДЛЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Исходя из требований заказчика возможно рассмотрение две группы вариантов.

Первая группа связана с использованием серийного оборудования: устанавливается высокоскоростной трехфазный асинхронный двигатель и понижающий редуктор.

Вторая группа включает замену существующего двигателя постоянного тока низкоскоростными асинхронными и синхронными двигателями.

Последовательный преобразователь частоты может использоваться для контроля скорости.

Ниже приведен список возможных вариаций:

1. Высокоскоростной асинхронный двигатель 2570 кВт с редуктором

2. Замена существующего двигателя постоянного тока на варианты:

- Асинхронный двигатель 2570 кВт
- Синхронный двигатель 2750 кВт

3. Встраивание нового двигателя в маховик

- Радиальный асинхронный двигатель 2570 кВт
- Торцевой асинхронный двигатель 2570 кВт

4. Устранение маховика и его замена на двигатель большого диаметра с эквивалентной инерционной массой

- Асинхронный двигатель 1375 кВт
- Синхронный двигатель с когтеобразными полюсами с постоянными магнитами 1375 кВт

Для предварительного анализа всех рассмотренных вариантов была использована программа максвелл врм эксперте

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

1.1 Высокоскоростной асинхронный двигатель 2570 кВт

Суть этого варианта заключается в замене существующего двигателя постоянного тока на серийный высокоскоростной асинхронный двигатель с понижающим редуктором. Трехмерная модель привода показана на рис. 3

Этот вариант имеет несколько преимуществ и недостатков. Основным преимуществом этого варианта является использование серийного оборудования, производимого на специализированных предприятиях. Также не требуется проектирование нового оборудования для привода.

Недостатки варианта:

- недолговечность редуктора, сложность обслуживания редуктора (требуется постоянная подача смазки)
- Размеры не позволяют установить второй независимый привод.

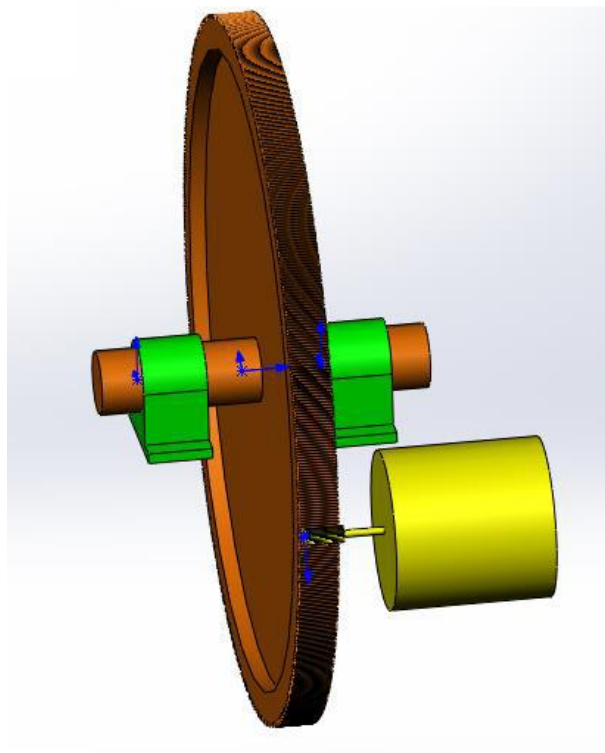


Рис. 3. Трехмерная модель привода

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

13

1.2 Замена существующего двигателя постоянного тока асинхронным двигателем 2570 кВт

Этот вариант модернизации привода состоит в замене двигателя постоянного тока на трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором мощностью 2570 кВт с аналогичными габаритными размерами.

Трехмерная модель асинхронного двигателя показана на рис. 4.

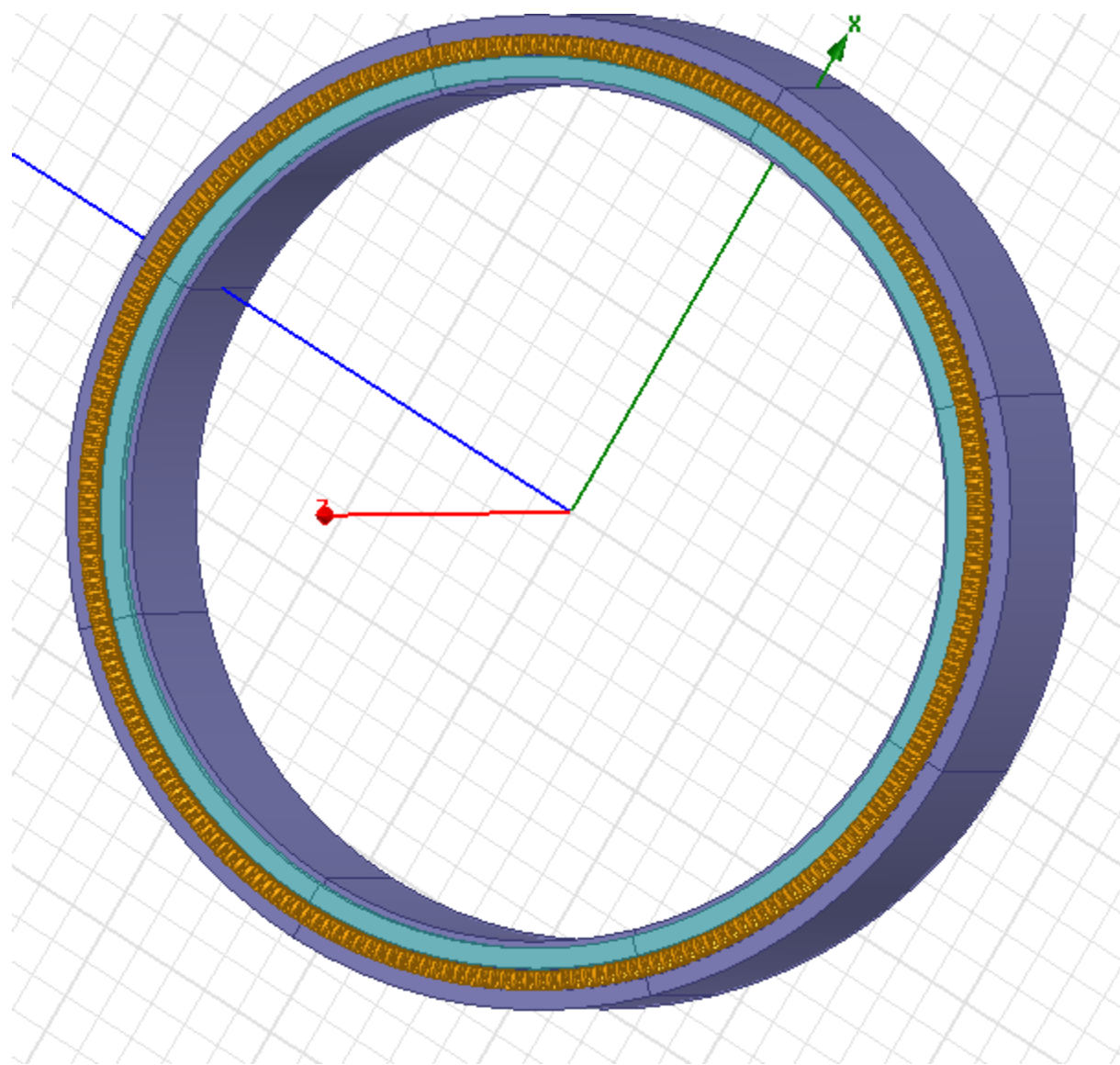


Рис. 4. Трехмерная модель асинхронного двигателя 2570 кВт.

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

14

Данный вариант обладает следующими достоинствами:

- простота конструкции и отсутствие контактного токоподвода обеспечивает высокую надежность двигателя

- двигатель вписывается в существующие габариты

Недостатки варианта:

- Асинхронный двигатель обладает низким коэффициентом мощности, возникает необходимость в компенсации реактивной мощности, что увеличивает цену привода,

- габариты двигателя не позволяют установить второй независимый привод.

1.3 Замена существующего двигателя постоянного тока синхронным двигателем 2570 кВт.

Двигатель постоянного тока заменяется трехфазным синхронным двигателем мощностью 2570 кВт с аналогичными размерами. Трехмерная модель двигателя показана на рис.5, 6.

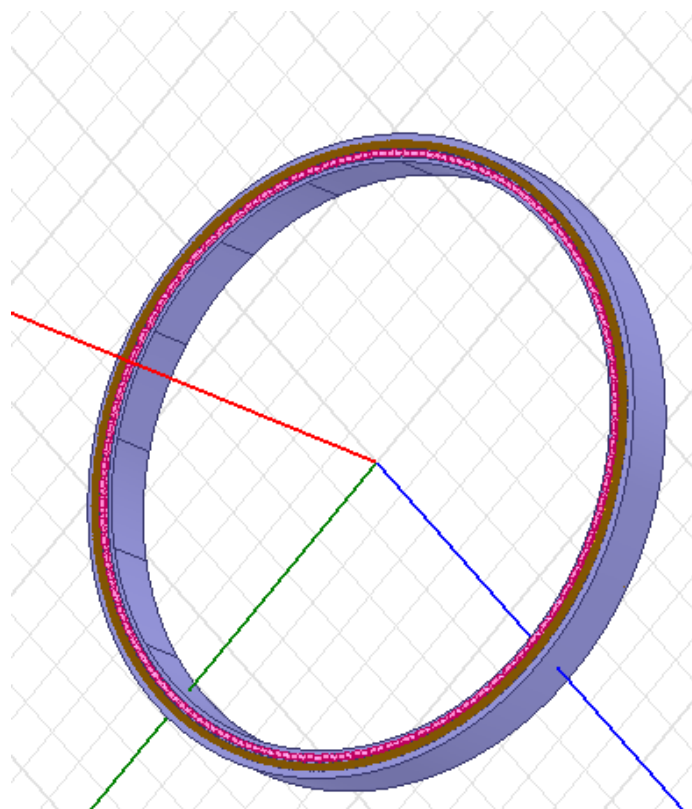


Рис. 5. Трехмерная модель синхронного двигателя 2570 кВт

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

15

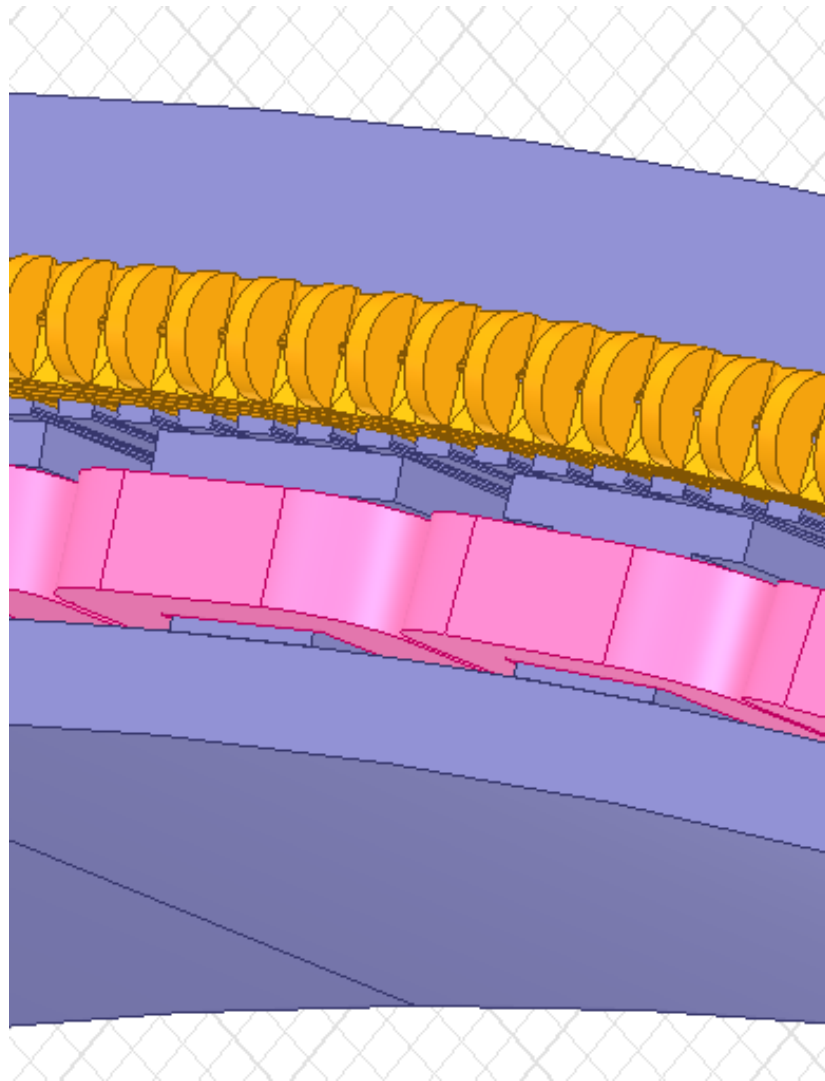


Рис. 6. Обмотки статора и ротора синхронного двигателя 2570 кВт

Преимущества варианта:

- двигатель вписывается в существующие габариты,
- двигатель имеет коэффициент мощности 1,0, компенсация реактивной мощности не требуется.

Недостатки варианта:

- двигатель имеет контактный токоподвод для возбуждения что снижает надежность, требуется дополнительное обслуживание двигателя,
- габариты двигателя не позволяют установить второй независимый привод.

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

16

1.4 Встраивание нового двигателя в маховик

Суть этого варианта заключается в использовании массивного маховика в качестве ротора электродвигателя.

Эта концепция является инновационной - в современной промышленности нет примеров использования таких электрических машин.

1.4.1 Радиальный асинхронный двигатель 2570 кВт

Суть этой концепции заключается в том, чтобы использовать маховик в качестве ротора и построить статор вокруг той части маховика, которая не утоплена в земле. На маховике с помощью сварных медных колец и шин прямоугольного сечения образуется «беличья клетка» - короткозамкнутый ротор. На боковой поверхности маховика устанавливается железо с пазами для обмотки, выполненной из медных шин прямоугольного сечения. Обмотка статора выполнена из проводника прямоугольного сечения. Трехмерная модель радиального асинхронного двигателя показана на рис. 7.8.

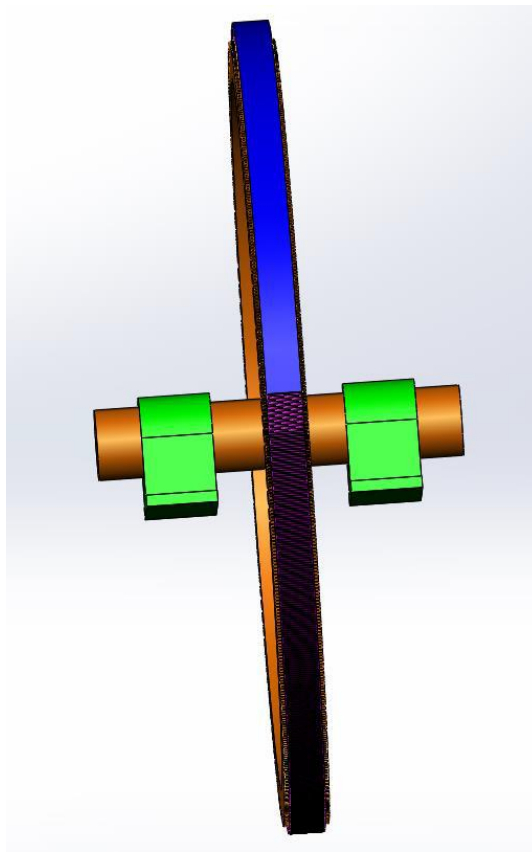


Рис. 7. Трехмерная модель радиального асинхронного двигателя 2570 кВт

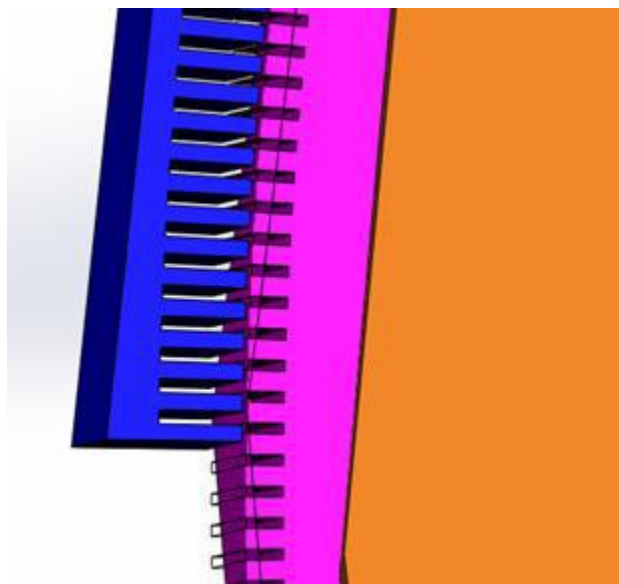


Рис. 8. Пазы статора и ротора

Достоинства варианта:

- минимальная стоимость материалов для изготовления двигателя, так как существующие детали используются для монтажа,
- габариты позволяют размещение второго независимого привода
- Вариант имеет небольшие технические риски, так как в случае невыполнения своих функций старый привод остается работоспособным

Недостатки:

- существующие измеренные биения (10 мм) образуют большой воздушный зазор, что значительно снижает коэффициент мощности, требуется компенсация реактивной мощности, что увеличивает стоимость привода,
- высокая сложность установки сегментов двигателя на рабочем месте, сложность регулировки воздушного зазора.

1.4.2 Торцевой асинхронный двигатель 2570 кВт

Суть данной концепции заключается в установке торцевого двигателя на маховике. Трехмерная модель торцевого двигателя показана на рис.9.

Торцевой двигатель имеет характеристики, аналогичные характеристикам радиального асинхронного двигателя, и имеет те же

преимущества и недостатки. Дополнительным недостатком торцевого двигателя является наличие больших односторонних тяжений.

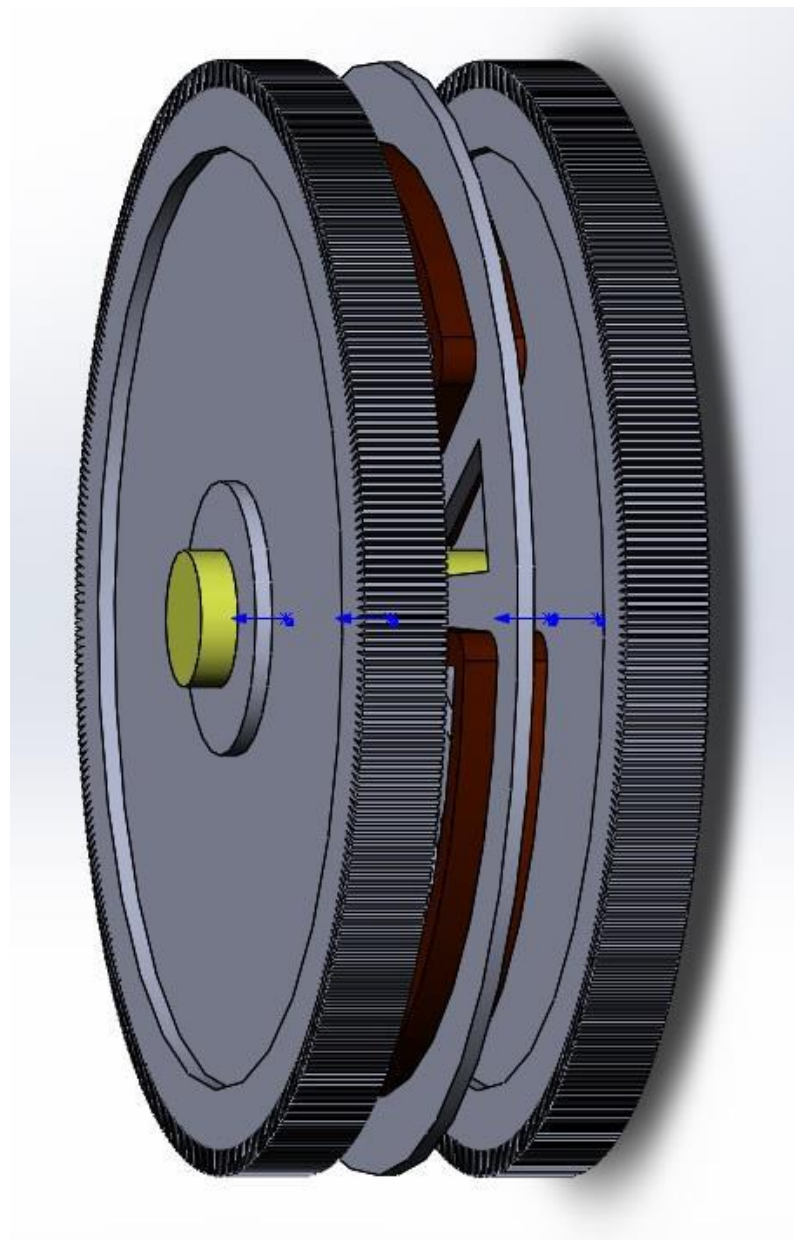


Рис. 9. Модель торцевого электродвигателя.

1.5 Исключение маховика и замена его двигателем большого диаметра с эквивалентной инерционной массой.

В ранее рассмотренных вариантах функция двигателя заключалась в том, чтобы раскручивать маховик и дополнительно поддерживать постоянную

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

19

скорость вращения маховика. В концепции, за исключением маховика от электропривода, двигатель играет роль маховика, поэтому двигатель должен иметь инерционную массу, эквивалентную массе маховика.

Отсутствие маховика позволяет установить два независимых привода на базе двигателей мощностью 1375 кВт.

1.5.1 Синхронный двигатель с когтеобразными полюсами с постоянными магнитами 1375 кВт

Суть этого варианта заключается в установке двух независимых приводов на основе синхронного двигателя с когтеобразными полюсами, с постоянными магнитами.

Синхронные двигатели с когтеобразными полюсами имеют следующий ряд достоинств:

- Двигатель имеет коэффициент мощности 1; компенсация реактивной мощности не требуется,
- Конструкция двигателя позволяет размещать постоянные магниты без дополнительного оборудования, простота сборки,
- Небольшая площадь наконечника полюса когтеобразного полюса позволяет достичь большого значения магнитного потока в воздушном зазоре при меньших значениях индукции на поверхности постоянных магнитов,
- Двигатель имеет большую инерционную массу, что исключает маховик привода,
- Габариты двигателя позволяют установку двух независимых приводов
- Малая относительная длина машины

Недостатком этого типа двигателя является наличие дорогих постоянных магнитов.

Этот вариант имеет наибольшее количество преимуществ, синхронные двигатели имеют высокий коэффициент полезного действия (КПД), однако

изготовление двигателя большого диаметра может потребовать большого расхода материалов.

1.5.2 Асинхронный двигатель 1375 кВт

Этот вариант предполагает установку двух асинхронных двигателей большого диаметра с инерционной массой, эквивалентной массе маховика. Для этого диаметра ротора двигателя должен быть равен диаметру маховика. Это позволяет сделать два независимых привода. Трехмерная модель асинхронного двигателя показана на рис.10.

Достоинства:

- электродвигатель изготавливается на специализированном предприятии с гарантией, поставляется в виде готового комплектующего изделия,

- двигатель имеет большую инерционную массу, что позволяет исключить маховик из привода,

- Двигатель имеет закрытое исполнение, что уменьшает шум, повышает надежность и безопасность

- асинхронные двигатели для заданной мощности могут быть изготовлены в Челябинске на АО "РЭД"

- габариты двигателя позволяют установку второго независимого привода.

Недостатки:

- у двигателя низкий коэффициент мощности, требуется компенсация реактивной мощности, что увеличивает стоимость привода.

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		21

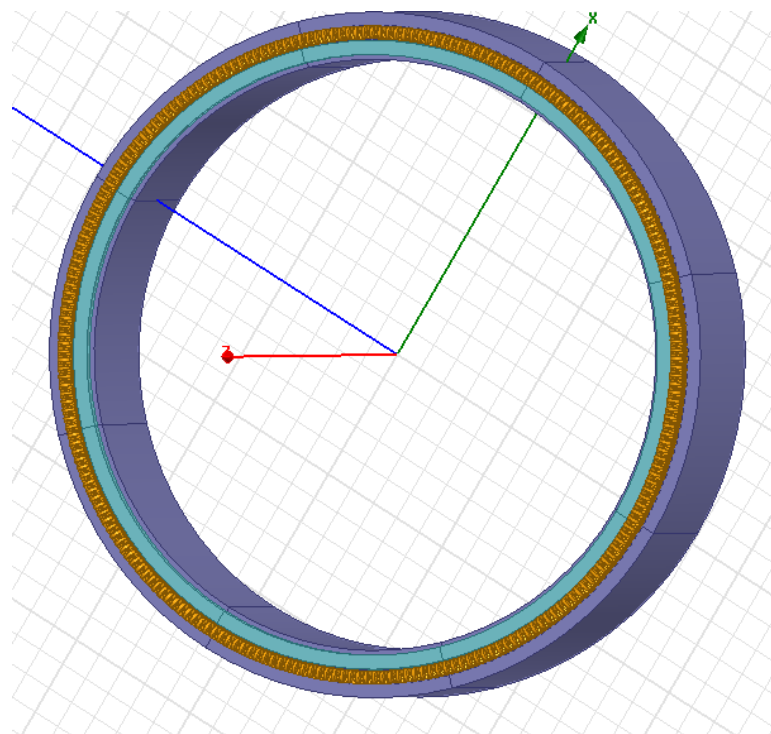


Рис. 10. Модель асинхронного двигателя 1375 кВт большого диаметра

Данный вариант выбран в качестве базового варианта для анализа.

Данный двигатель обладает высокой надежностью за счет бесконтактного тока подвода, высоким КПД. Двигатель технологичен с точки зрения его производства. Двигатели данного класса могут быть изготовлены на АО «Транснефть. Русские электродвигатели», который специализируется на выпуске мощных высоковольтных АД

2.ОСОБЕННОСТИ АСИНХРОННЫХ МАШИН

Асинхронные машины относятся к классу электрических машин переменного тока. Мощность асинхронных машин может составлять от доли ватта до нескольких тысяч киловатт.

Асинхронные машины являются обратимыми, то есть они могут работать в режиме двигателя и в режиме генератора. В режиме двигателя рабочие характеристики и эксплуатационные свойства асинхронной машины лучше, чем в режиме генератора. Поэтому асинхронные машины почти всегда используются в качестве двигателей. Асинхронные двигатели характеризуются высокой надежностью в эксплуатации, простой конструкцией и простотой эксплуатации.

2.1 Устройство трехфазного асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель (рис. 11) состоит из двух основных частей: статора и ротора.

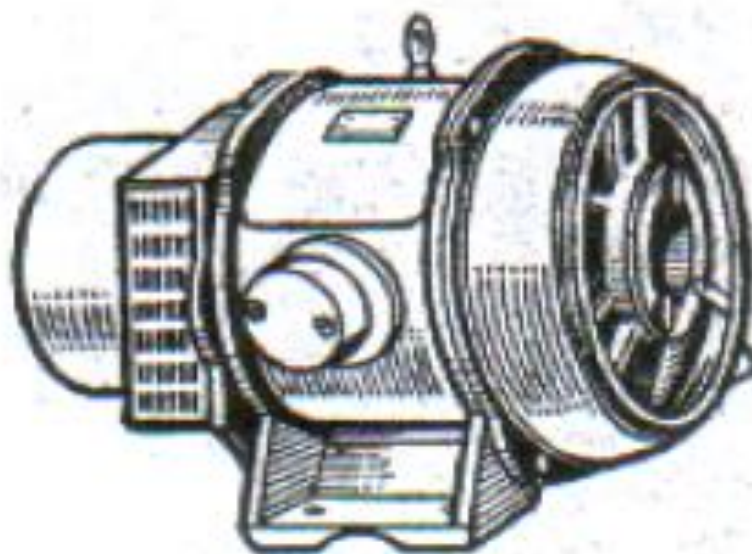


Рис.11. Асинхронный двигатель

Изм	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

23

Статор представляет собой неподвижную часть машины, которая состоит из станины с сердечником и трехфазной обмотки. Сердечник изготовлен из листов электротехнической стали. Фазы трехфазной обмотки размещены в пазах сердечника, расположенных в пространстве относительно друг друга под углом 120° . Начало и конец фаз обмотки выведены на зажимы клеммной коробки, расположенной на корпусе машины. В зависимости от напряжения, на которое рассчитана обмотка статора, он подключается по схеме звезда или треугольник.

Ротор является вращающейся частью машины. Ротор состоит из вала с сердечником и катушки. Сердечник имеет цилиндрическую форму, изготовлен из листов электротехнической стали.

Ротор асинхронного двигателя может быть короткозамкнутым или синфазным.

Большинство используемых двигателей имеют короткозамкнутый ротор (рис. 11, а). Эти двигатели намного дешевле и их обслуживание намного проще.

Обмотка короткозамкнутого ротора выполнена в виде медных или алюминиевых стержней, размещенных в пазах сердечника. Стержни короткозамкнуты между собой (рис. 11, б). Из-за их внешнего вида короткозамкнутая обмотка называется «беличье колесо» или «беличья клетка».

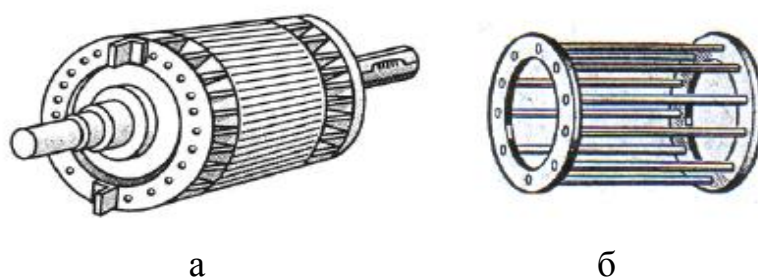


Рис. 11. Общий вид короткозамкнутого ротора (а) и короткозамкнутой обмотки типа «беличье колесо» (б)

Фазовый ротор (рис. 12, а) имеет трехфазную обмотку, соединенную по схеме «звезда» (реже «треугольник»). Концы фазы обмотки ротора соединены с тремя медными кольцами, закрепленными на валу ротора и изолированными друг от друга и от стального сердечника ротора. Этот двигатель также получил название двигателя с контактными кольцами.

Три кольца жестко закреплены на валу ротора через изолирующие прокладки. Щетки размещены на кольцах, которые размещены в щеткодержателях, установленных на одной из крышек подшипников (рис.12, б). Через щетки и кольца обмотка ротора подключена к клеммной коробке.

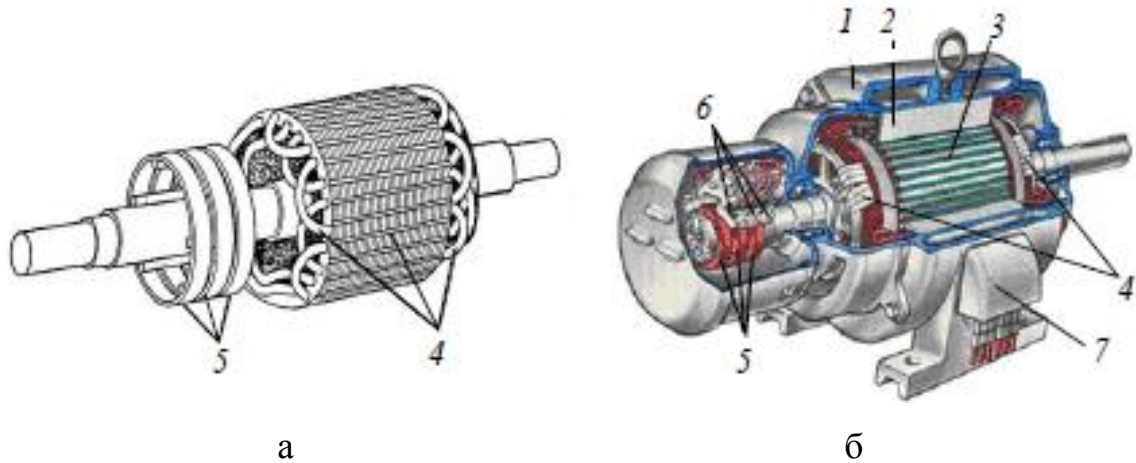


Рис. 12. Общий вид фазного ротора (а) и асинхронной машины с фазным ротором в разрезе (б): 1 – станина; 2 – сердечник статора; 3 – сердечник ротора; 4 – обмотка ротора; 5 – контактные кольца; 6 – щетки; 7 – клеммная коробка.

Включение реостата в цепь ротора значительно улучшает условия запуска двигателя: уменьшает пусковой ток и увеличивает пусковой крутящий момент. Кроме того, реостат, включенный в контур ротора, позволяет плавно регулировать частоту вращения двигателя.

2.2. Вращающееся магнитное поле статора асинхронного двигателя

Принцип работы асинхронного двигателя основан на получении вращающегося магнитного поля. При наложении на обмотку статора трехфазного напряжения в фазах обмотки протекают токи i_a , i_b , i_c .

На рисунке 13 представлен график трехфазной системы токов и упрощенные изображения результирующего магнитного поля за четыре момента времени.

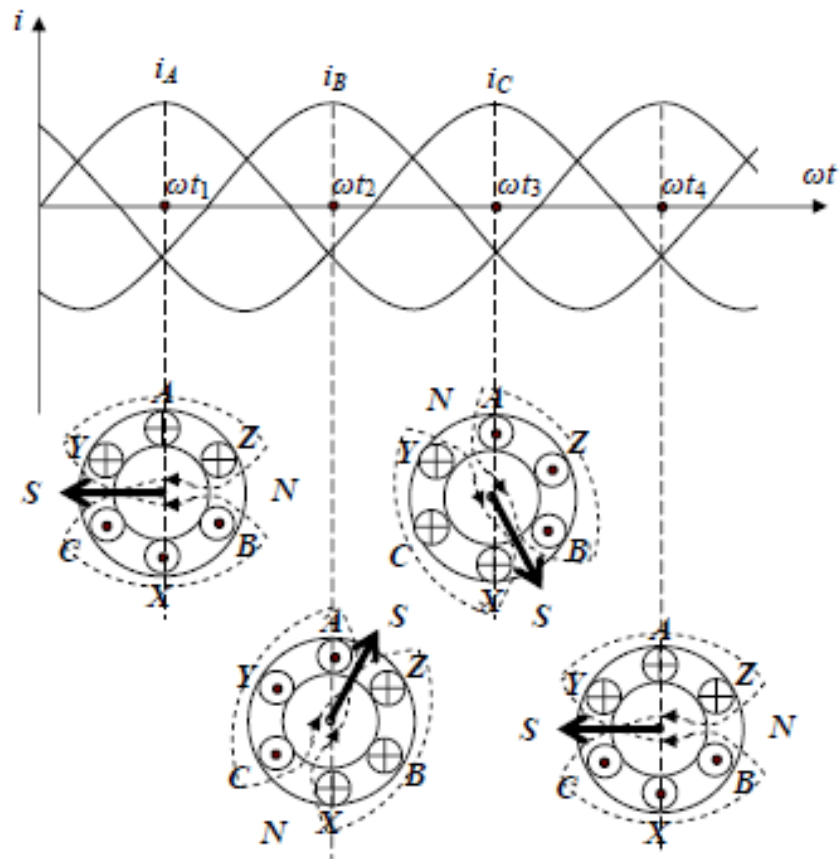


Рис. 13. График трехфазной системы токов и упрощенные изображения результирующего магнитного поля за четыре момента времени: А, В, С - начало фаз обмотки статора; X, Y, Z - концы фаз обмотки статора

Ток в каждой фазе создает свое собственное переменное магнитное поле. Эти поля складываются и образуют результирующее магнитное поле. Картина результирующего магнитного поля непрерывно изменяется, но ее возможно представить для любого момента времени (рис. 13). Направление от начала до конца фазы обмотки статора считается положительным направлением токов.

На рис. 13 Стрелка указывает направление оси полюса магнитного поля. На рисунке показано, что при изменении токов весь спектр силовых линий магнитного поля равномерно поворачивается и конфигурация силовых линий не изменяется. Это поле называется вращающимся.

Количество пар полюсов основного магнитного поля асинхронного двигателя определяется количеством катушек в каждой фазе и способом подключения этих катушек.

Если две фазы напряжения, подаваемого на статор, поменять местами, т.е. изменить порядок чередования токов в обмотках статора на обратный, результирующее магнитное поле будет вращаться в противоположном направлении.

2.3. Принцип действия асинхронного двигателя

Когда двигатель запускается в трехфазной сети, в статоре образуется вращающееся магнитное поле, силовые линии которого пересекают обмотки статора и ротора. В этом случае согласно закону электромагнитной индукции в каждой фазе обмоток статора и ротора наводятся ЭДС.

При замкнутой цепи ротора ток I_2 течет в обмотке ротора под действием ЭДС E_2 . Взаимодействие тока ротора с магнитным полем машины вызывает появление вращающегося электромагнитного момента:

$$M = C \cdot \phi \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2 \quad (1)$$

где C – постоянный коэффициент, зависящий от конструкции двигателя; $\cos\varphi_2$ – коэффициент мощности цепи ротора; $I_2 \cdot \cos\varphi_2$ – активная составляющая тока ротора.

Ротор вращается в том же направлении, что и магнитное поле статора. Частота вращения ротора асинхронной машины, работающей в режиме двигателя, всегда ниже частоты вращения магнитного поля статора, поскольку только в этом случае будет иметь место изменение магнитного потока, проходящего через обмотку ротора.

Мерой отставания частоты вращения ротора n_2 от частоты вращения магнитного поля n_1 является скольжение.

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2)$$

При неподвижном роторе ($n_2=0$) $S=1$.

Если ротор двигателя вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора ($n_2 = n_1$), то $S = 0$. Этот режим называется идеальным холостым ходом.

2.4 Свойство саморегулирования вращающего момента асинхронного двигателя

Номинальной работе двигателя соответствуют номинальные параметры: вращающий момент M_n , скольжение S_n и частота вращения n_{2n} (рис. 14).

С увеличением нагрузки на вал двигателя частота вращения ротора n_2 уменьшается, поэтому скольжение S будет увеличиваться.

Увеличение скольжения, согласно формуле (2), приведет к увеличению ЭДС ротора E_2 , в результате чего ток I_2 ротора будет увеличиваться. В соответствии с уравнением (1) $M = C \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2$. Следовательно, увеличение тока ротора приведет к увеличению крутящего момента, который в устойчивом состоянии уравновешивает крутящий момент нагрузки на валу.

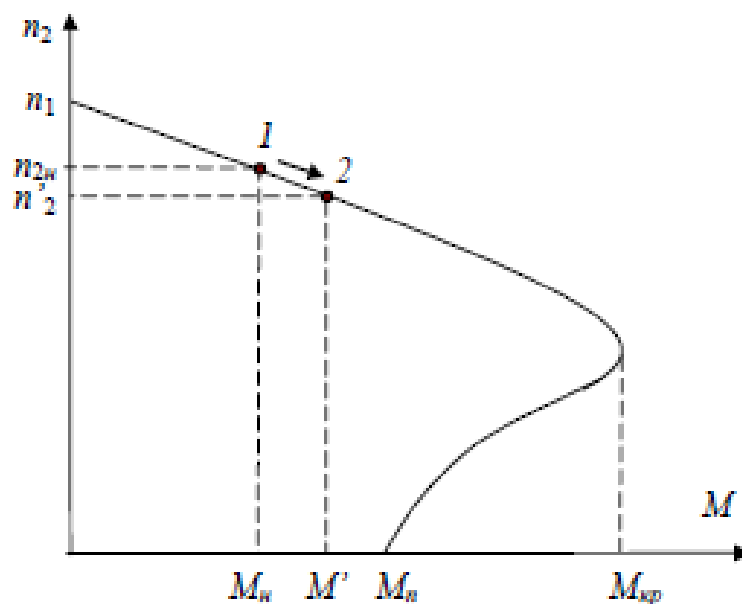


Рис. 14. Увеличение вращающего момента при возрастании нагрузки на валу двигателя

Таким образом, на увеличение крутящего момента нагрузки, двигатель реагирует путем увеличения вращающего момента при более низкой скорости вращения ротора. Это установит новое состояние равновесия. Рабочая точка по

механическим характеристикам переместится из положения 1 в положение 2 (см. Рис. 14), что соответствует крутящему моменту $M' > M_n$, скольжению $S' > S_n$ и частота вращения $n'^2 < n^2$

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		29

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ БАЗОВОГО ВАРИАНТА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

3.1. Выбор главных размеров

В начальной стадии проектирования машины рассчитывают главные размеры. При выборе главных размеров и электромагнитных нагрузок необходимо учесть дополнительные требования технического задания.

$$m = 3, U = 6000 \text{ В}, P_2 = 1375 \cdot 10^3 \text{ В}$$

Выбираем внешний диаметр статора $D_a = 9.4$ м. Станина выбирается литая.

$k_D = 0,9574$, следовательно внутренний диаметр статора:

$$D = k_D \cdot D_a \quad (1)$$

$$D = 9.4 \cdot 0,9574 = 9 \text{ м.}$$

Определим число пар полюсов

$$p = \frac{60 \cdot f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{35} = 86, \quad (2)$$

где f - частота питающей сети, $f = 50$ Гц;

n - номинальная частота вращения, $n = 35$ об/мин.

Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 9}{2 \cdot 86} = 0,164 \text{ м.}$$

Расчетная мощность:

$$P' = P_2 \frac{k_E}{\eta \cos \varphi}, \quad (4)$$

где k_E - отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению.

Принимаем $k_E = 1,05$

По исходным данным КПД и $\cos \varphi$ равны:

$$\eta=0,965$$

$$\cos\varphi=0,9$$

Тогда получим:

$$P' = 1,375 \cdot 10^6 \frac{1,05}{0,965 \cdot 0,9} = 1,662 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Электромагнитные нагрузки (предварительно по [12, рис. 9.23, а]):

Электромагнитная нагрузка

$$A=28 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

Индукция в воздушном зазоре:

$$B_{\delta} = 0,72 \text{ Тл}$$

Обмоточный коэффициент (предварительно для двуслойной обмотки):

$$k_{об1} = 0,92$$

Синхронная частота вращения:

$$\Omega = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (5)$$

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot 50}{86} = 3,653 \text{ рад/с}$$

Расчетная длина магнитопровода:

$$l_{\delta} = \frac{P'}{D^2 \Omega k_B k_{об1} A B_{\delta}} \quad (6)$$

$$l_{\delta} = \frac{1,662 \cdot 10^3}{9^2 \cdot 3,653 \cdot 1,21 \cdot 0,92 \cdot 28000 \cdot 0,72} = 0,25 \text{ м}$$

где $k_B = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,21$ – коэффициент формы поля

$$\text{Коэффициент полюсного перекрытия: } a_{\delta} = \frac{2}{\pi} = 0,64 \quad (7)$$

Определим соотношение:

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau} \quad (8)$$

$$\lambda = \frac{0,25}{0,164} = 1,523$$

Согласно [12, рис. 9.25] коэффициент λ находится в допустимых пределах, значит главные размеры выбраны верно.

Так как длина сердечников рассчитываемой асинхронной машины не превышает 250-300 мм, то радиальные вентиляционные каналы не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции:

$$l_1 = l_{ст1} = l_{\delta}$$

3.2 Определение Z_1 , W_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора

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

Выберем предельные значения зубцовых делений статора по [1, рис. 9.26]:

$$t_{Z1min} = 0,057 \text{ м}$$

$$t_{Z1max} = 0,054 \text{ м}$$

Тогда число пазов статора:

$$Z_{1min} \dots Z_{1max} = \frac{\pi D}{t_{Z1max}} \dots \frac{\pi D}{t_{Z1min}} \quad (9)$$

$$Z_{1min} \dots Z_{1max} = \frac{\pi \cdot 9}{0,057} \dots \frac{\pi \cdot 9}{0,054} = 496,017 \dots 523,573$$

Примем $Z_1 = 516$, тогда:

Число пазов на полюс и фазу:

$$q_1 = \frac{Z_1}{2pm} \quad (10)$$

$$q_1 = \frac{516}{2 \cdot 86 \cdot 3} = 1$$

Зубцовое деление статора (окончательно):

$$t_{z1} = \frac{\pi D}{2pmq_1} \quad (11)$$

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot 9}{2 \cdot 86 \cdot 3 \cdot 1} = 0.055 \text{ м}$$

Полученное значение входит в указанные выше пределы.

Число эффективных проводников в пазу (предварительно, при $a=1$):

$$u'_\pi = \frac{\pi DA}{I_{1ном} Z_1} \quad (12)$$

где $I_{1ном}$ – номинальный ток обмотки статора, А:

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{mU_{1ном}\eta \cos \varphi} \quad (13)$$

$$I_{1ном} = \frac{1375 \cdot 10^6}{3 \cdot 6000 \cdot 0,9 \cdot 0,965} = 87,955 \text{ А}$$

тогда

$$u'_\pi = \frac{\pi \cdot 9 \cdot 28000}{87,955 \cdot 516} = 17,443$$

Принимаем $a = 1$, тогда:

$$u_{\Pi} = au'_{\Pi} \quad (14)$$

$$u_{\Pi} = 17$$

Округляя u_{Π} до ближайшего целого значения, принимаем $u_{\Pi} = 8$

Окончательное число витков в фазе обмотки:

$$w_1 = \frac{u_{\Pi} Z_1}{2am} \quad (15)$$

$$w_1 = \frac{17 \cdot 516}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 1,462 \cdot 10^3$$

Окончательное значение линейной нагрузки:

$$A = \frac{2I_{1\text{ном}} w_1 m}{\pi D} \quad (16)$$

$$A = \frac{2 \cdot 87,955 \cdot 1,462 \cdot 10^3 \cdot 3}{\pi \cdot 9} = 2,729 \cdot 10^4 \text{ А/м}$$

Выбираем концентрическую двухслойную обмотку из круглого провода.

Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4k_B w_1 k_{061} f_1} \quad (17)$$

$$\Phi = \frac{1,05 \cdot 6000}{4 \cdot 1,21 \cdot 1,462 \cdot 10^3 \cdot 0,825 \cdot 50} = 0,022 \text{ Вб}$$

Индукция в воздушном зазоре:

$$B_{\delta} = \frac{p\Phi}{Dl_{\delta}} \quad (18)$$

$$B_{\delta} = \frac{86 \cdot 0,022}{9 \cdot 0,25} = 0,824 \text{ Тл}$$

Полученное значение не выходит за пределы рекомендуемой области более чем на 5%.

Плотность тока в обмотке статора (предварительно):

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	Лист
						34
Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

$$J_1 = \frac{AJ}{A} \quad (19)$$

Значение AJ определим из [12, рис. 9.27 б] $AJ = 185 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{м}^3$.

Тогда:

$$J_1 = \frac{185 \cdot 10^9}{2,729 \cdot 10^4} = 6,779 \cdot 10^6 \text{ A}/\text{м}^2$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно):

$$q_{\text{эф1}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{aJ_1} \quad (20)$$

$$q_{\text{эф1}} = \frac{87,955}{1 \cdot 6,779 \cdot 10^6} = 12,97 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Примем $n_{\text{эл}} = 10$

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф1}}}{n_{\text{эл}}} \quad (21)$$

$$q_{\text{эл}} = \frac{1,297 \cdot 10^{-5}}{10} = 1,297 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Тогда выбираем обмоточный провод ПЭТ-155 по [12, прил. ПЗ.1]:

$$q_{\text{эл}} = 4,36 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2, \quad d_{\text{эл}} = 2,36 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad d_{\text{из}} = 2,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Плотность тока в обмотке статора (окончательно):

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{aq_{\text{эл}}n_{\text{эл}}} \quad (22)$$

$$J_1 = \frac{87,955}{1 \cdot 1,297 \cdot 10^{-6} \cdot 10} = 6,779 \cdot 10^6 \text{ A}/\text{м}^2$$

3.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора

Размеры пазов в электрических машинах должны быть выбраны таким образом, чтобы, во-первых, площадь поперечного сечения паза соответствовала количеству и размерам размещаемых в нем проводников обмотки с учетом

изоляции и, во-вторых, чтобы значения индукций в зубцах и ярме статора находились в определенных пределах, зависящих от типа, мощности, исполнения машины и от марки электротехнической стали сердечника.

Предварительно принимаем:

$$B_a = 1,6 \text{ Тл}, B_{z1} = 1,2 \text{ Тл}.$$

По [12, табл. 9.13] определяем коэффициент заполнения сердечника сталью $k_{c1} = 0,95$.

Ширина зубца статора:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} t_{z1} l_{\delta}}{B_{z1} l_{ct} k_{c1}} \quad (23)$$

$$b_{z1} = \frac{0,824 \cdot 0,055 \cdot 0,25}{1,2 \cdot 0,25 \cdot 0,95} = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Высота ярма статора:

$$h_a = \frac{\Phi}{2B_a l_{ct} k_{c1}} \quad (24)$$

$$h_a = \frac{0,022}{2 \cdot 1,6 \cdot 0,25 \cdot 0,95} = 0,028 \text{ м}$$

Размеры паза в штампе:

Угол наклона грани клиновой части в трапецеидальных пазах у двигателей $h > 250$ мм обычно $\beta = 30^\circ$.

Так как $h = 280$ мм высоту шлица паза принимаем $h_{ш} = 1 \cdot 10^{-3}$ м, ширина шлица паза $b_{ш} = 4,46 \cdot 10^{-3}$ м, $h_a = 0,123$ м

$$h_{п} = \frac{D_a - D}{2} - h_a \quad (25)$$

$$h_{п} = \frac{9,4 - 9}{2} - 0,028 = 0,077 \text{ м}$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{п}})}{Z_1} - b_{Z1} \quad (26)$$

$$b_2 = \frac{\pi(9 + 2 \cdot 0,077)}{516} - 10 \cdot 10^{-3} = 22,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{ш}} - b_{\text{ш}}) - Z_1 b_{Z1}}{Z_1 - \pi/\sqrt{3}} \quad (27)$$

$$b_1 = \frac{\pi(0,286 + 2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} - 4,46 \cdot 10^{-3}) - 36 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{36 - \pi/\sqrt{3}}$$

$$= 15,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Расчет паза «в свету» с учетом припуска на сборку:

По [1, табл. 9.14] определяем припуски по ширине и высоте паза:

По ширине $\Delta b_{\text{п}} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

По высоте $\Delta h_{\text{п}} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Тогда:

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_{\text{п}}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_{\text{п}}$$

$$h'_{\text{п}} = h_{\text{п}} - \Delta h_{\text{п}}$$

(28)

$$b'_1 = 15,5 \cdot 10^{-3} - 0,3 \cdot 10^{-3} = 15,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$b'_2 = 22,6 \cdot 10^{-3} - 0,3 \cdot 10^{-3} = 22,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$h'_{\text{п}} = 43,6 \cdot 10^{-3} - 0,3 \cdot 10^{-3} = 43,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Высота клиновой части паза:

$$h_{\text{к}} = \frac{b_1 - b_{\text{ш}}}{2\sqrt{3}} \quad (29)$$

$$h_k = \frac{15,5 \cdot 10^{-3} - 4,46 \cdot 10^{-3}}{2\sqrt{3}} = 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Тогда:

$$h'_{п.к} = h'_п - (h_{ш} + h_k) \quad (30)$$

$$h'_{п.к} = 43,3 \cdot 10^{-3} - (1 \cdot 10^{-3} + 3,2 \cdot 10^{-3}) = 39 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Площадь поперечного сечения паза, остающаяся свободной для размещения проводников обмотки:

$$S'_п = \frac{b'_1 + b'_2}{2} h'_{п.к} - (S_{из} + S_{пр}) \quad (31)$$

где: $S_{из}$ – площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу, м^2 :

$$S_{из} = b_{из}(2h_п + b_1 + b_2) \quad (32)$$

где $b_{из}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу. По [1, табл. 3.1] выбираем $b_{из} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$S_{из} = 0,28 \cdot 10^{-3}(2 \cdot 43,6 \cdot 10^{-3} + 15,5 \cdot 10^{-3} + 22,6 \cdot 10^{-3}) = 35 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

$S_{пр}$ – площадь, занимаемая прокладками в пазу:

$$S_{пр} = b_{прок}(b_1 + b_2) \quad (33)$$

где $b_{прок}$ – ширина прокладки, выбираем $b_{прок} = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

$$S_{пр} = 0,0006(15,5 \cdot 10^{-3} + 22,6 \cdot 10^{-3}) = 22,86 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Тогда:

$$\begin{aligned} S'_п &= \frac{15,2 \cdot 10^{-3} + 22,3 \cdot 10^{-3}}{2} 39 \cdot 10^{-3} - (35 \cdot 10^{-6} + 22,86 \cdot 10^{-6}) = \\ &= 6,75 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \end{aligned}$$

Для проверки правильности размещения обмотки в пазах рассчитаем значение коэффициента заполнения паза:

$$k_3 = \frac{d_{из}^2 u_{п} n_{эл}}{S'_{п}} \quad (34)$$

$$k_3 = \frac{(2,46 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 8 \cdot 10}{6,75 \cdot 10^{-4}} = 0,717$$

Полученное значение k_3 ниже рекомендованного.

Определим воздушный зазор:

$$\delta \approx \frac{D}{1,6} \left(1 + \frac{9}{2p}\right) \cdot 10^{-3} \quad (35)$$

$$\delta \approx \frac{9}{1,6} \left(1 + \frac{9}{172}\right) \cdot 10^{-3} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Эскиз паза статора приведен на рисунке 15.

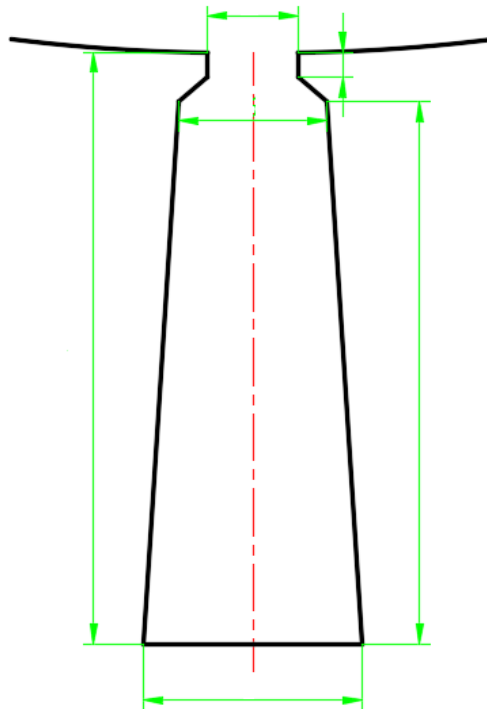


Рисунок 15. Эскиз паза статора проектируемого двигателя

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

39

3.4 Расчет ротора

Число пазов ротора примем: $Z_2 = 576$

Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\delta \quad (36)$$

$$D_2 = 0,286 - 2 \cdot 6 \cdot 10^3 = 9 \text{ м}$$

Длина магнитопровода ротора $l_2 = l_1 = l_\delta = 0,25 \text{ м}$

Зубцовое деление ротора:

$$t_{z2} = \frac{\pi D_2}{Z_2} \quad (37)$$

$$t_{z2} = \frac{\pi \cdot 9}{576} = 0,049 \text{ м}$$

Сердечник ротора выполнен с непосредственной посадкой на вал без шпонки и промежуточной втулки:

$$D_j = D_B = k_B D_a \quad (38)$$

$$D_j = D_B = 0,7447 \cdot 9 = 7 \text{ м}$$

где коэффициент $k_B = 0,7447$ определен по [12, табл. 9.19].

Ток в обмотке ротора:

$$I_2 = k_i I_1 v_i \quad (39)$$

где:

k_i – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания, на отношение I_1/I_2 :

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cos \varphi \quad (40)$$

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot 0,9 = 0,92$$

v_i – коэффициент приведения токов:

$$v_i = \frac{2m_1 w_1 k_{об1}}{Z_2 k_{ск}} \quad (41)$$

$$v_i = \frac{2 \cdot 3 \cdot 1,462 \cdot 10^3 \cdot 0,825}{576 \cdot 1} = 12,557$$

где $k_{ск}$ – коэффициент скоса пазов ($k_{ск} = 1$)

Тогда:

$$I_2 = 0,92 \cdot 87,955 \cdot 12,557 = 1016 \text{ А}$$

Площадь поперечного сечения стержней (предварительно):

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} \quad (42)$$

$$q_c = \frac{1016}{2,5 \cdot 10^6} = 4,065 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

где плотность тока в обмотке ротора $J_2 = 2,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$

Паз ротора определяем по [12, рис. 9.41б] и принимаем: $h_B = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, и $h'_{ш} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. $B_{Z2max} = 1,9 \text{ Тл}$

Паз лопаточный, следовательно, необходимо рассчитывать отдельно верхнюю и нижнюю часть паза отдельно

$$b_{Z2H} = \frac{B_\delta \cdot t_{z2} \cdot l_\delta}{B_{Z2max} \cdot k_c \cdot l_\delta} = 8,517 \text{ мм}$$

$$b_{1H} = \frac{\pi(D_2 - (2h'_{ш} + h_B)) - Z_2 \cdot b_{Z2H}}{Z_2 + \pi} = 9,75 \text{ мм} \quad (43)$$

$$b_B = 0,5b_{1H} = 4,875 \text{ мм}$$

$$q_{c.H} = q_c - b_B(h_B - 0,11b_B) = 2,932 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

$$b_{2H} = \sqrt{\frac{\left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{Z_2}\right) \cdot b_{1H}^2 - 4 \cdot q_{c.H}}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{Z_2}}} = 3,4 \text{ мм}$$

Полная высота паза:

$$h_{1H} = \frac{Z_2}{2\pi} \cdot (b_{1H} - b_{2H}) = 44 \text{ мм} \quad (44)$$

Уточним площадь поперечного сечения нижней части:

$$q_{c.H} = \frac{\pi}{8}(b_{1H}^2 + b_{2H}^2) + \frac{1}{2}(b_{1H} + b_{2H})h_{1H} = 3,333 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (452)$$

$$q_c = q_{c.H} + b_B(h_B - 0,11b_B) = 4,038 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (463)$$

$$b_{ZBmax} = \frac{\pi(D_2 - (2h'_{ш} + h_B))}{Z_2} - b_B = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (474)$$

$$b_{ZBmin} = \frac{\pi(D_2 - 2h_B)}{Z_2} - b_B = 13 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (485)$$

$$h'_B = h_B + h'_{ш} = 16,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (496)$$

$$b'_{ZH} = \frac{\pi(D_2 - (2h'_B + b_{1H}))}{Z_2} - b_{1H} = 7,44 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (507)$$

$$b''_{ZH} = \frac{\pi(D_2 - (2h'_B + b_{2H}))}{Z_2} - b_{2H} = 14 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (518)$$

$$h_{ZB} = h'_B = 16,2 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (529)$$

$$h_{ZH} = h_{1H} - 0,1b_{2H} = 43,8 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (5310)$$

$$h_{п.р} = h_{ZH} + h_{ZB} + \frac{b_{2H} + b_{1H}}{2} = 66,6 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (5411)$$

Плотность тока в стержне:

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} \quad (55)$$

$$J_2 = \frac{1031}{4,038 \cdot 10^{-4}} = 2,70 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$$

Короткозамыкающие кольца выбраны по [12, рис. 9.376] (с литой обмоткой)

$$\Delta = 2 \sin\left(\frac{\pi p}{Z_2}\right) = 0,143 \quad (56)$$

Токи в кольце:

$$I_{\text{ккл}} = \frac{I_2}{\Delta} \quad (57)$$

$$I_{\text{ккл}} = \frac{1031}{0,143} = 7648 \text{ А}$$

Площадь поперечного сечения замыкающих колец:

$$q_{\text{ккл}} = \frac{I_{\text{ккл}}}{J_{\text{ккл}}} = 30 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \quad (58)$$

где $J_{\text{ккл}}=0,85J_2$ – плотность тока в замыкающих кольцах

Рассчитаем размеры колец:

Высота сечения кольца:

$$h_{\text{ккл}} = 1,25h_{\text{п2}} = 83,3 \text{ мм}$$

Ширина замыкающих колец:

$$b_{\text{ккл}} = \frac{q_{\text{ккл}}}{h_{\text{ккл}}} = 36 \text{ мм} \quad (59)$$

Средний диаметр замыкающих колец:

$$D_{\text{ккл.ср}} = D_2 - h_{\text{ккл}} = 0,2 \text{ м} \quad (60)$$

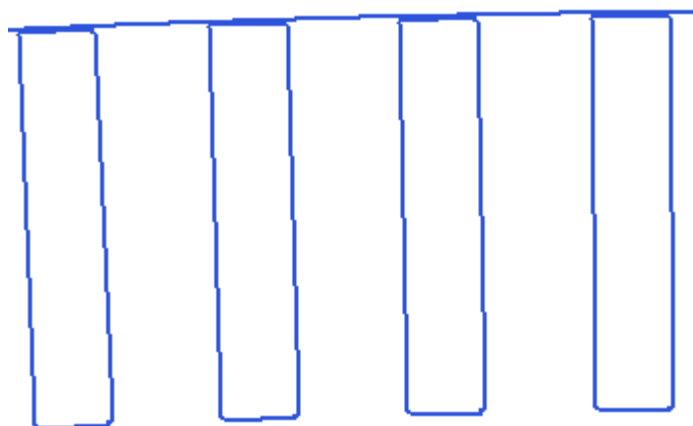


Рисунок 16. Эскиза паза ротора проектируемого двигателя

3.5 Расчет магнитной цепи

Расчет магнитной цепи проводят для режима холостого хода двигателей, при котором для асинхронных машин характерно относительно сильное насыщение стали зубцов статора и ротора.

Марку электротехнической стали рекомендуется выбирать в зависимости от высоты оси вращения проектируемого асинхронного двигателя. Для высоты вращения 280 мм выбираем электротехническую сталь марки 2312 толщиной 0,5 мм.

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} B_{\delta} \delta k_{\delta} \quad (61)$$

где k_{δ} – коэффициент воздушного зазора:

$$\gamma_1 = \frac{(b_{ш1}/\delta)^2}{5 + b_{ш1}/\delta} = 1,109 \quad (62)$$

$$k_{\delta} = \frac{t_{z1}}{t_{z1} - \gamma_1 \delta} \quad (63)$$

$$F_{\delta} = 1946 \text{ А}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$F_{Z1} = 2h_{Z1}H_{Z1} \quad (64)$$

где h_{Z1} – расчетная высота зуба статора ($h_{Z1} = h_{п1}$), H_{Z1} – расчетная напряженность поля в зубце.

Расчетная индукция в зубце:

$$B'_{Z1} = \frac{B_{\delta}t_{Z1}l_{\delta}}{B_{Z1}l_{ст}k_{с1}} = 1,7 \quad (65)$$

Расчет напряженность поля по [12, табл. П1.10] $H_{Z1} = 6750 \text{ А/м}$.

Тогда:

$$F_{Z1} = 2 \cdot 0,044 \cdot 6750 = 588,388 \text{ А}$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$F_{Z2} = 2h_{Z2}H_{Z2} \quad (66)$$

По таблице [12, табл. 9.20] при зубцах с рисунка [12, рис. 9.40а] имеем:

$$h_{Z2} = h_{п2} - 0,1b_2 = 66 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Индукция в зубце ротора:

$$B_{Z2} = \frac{B_{\delta}t_{Z2}l_{\delta}}{b_{Z2}l_{ст}k_{с2}} = 2,065 \quad (67)$$

Исходя из полученного значения индукции по [12, табл. П1.11] примем $H_{Z2} = 4160 \text{ А/м}$.

Тогда:

$$F_{Z2} = 2 \cdot 66 \cdot 10^{-3} \cdot 4160 = 551,355 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_\delta} \quad (68)$$

$$k_Z = 1 + \frac{146,544 + 218,25}{1129} = 1,506$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны находится в заданных пределах 1,2-1,5, следовательно, расчет зубцовых зон статора и ротора проведен правильно.

Магнитное напряжение ярма статора:

$$F_a = L_a H_a \quad (69)$$

где L_a – длина средней силовой линии в ярме статора:

$$L_a = \pi \frac{D_a - h_a}{2p} \quad (70)$$

При отсутствии аксиальных каналов:

$$L_a = \pi \frac{0,52 - 0,073}{6} = 0,472 \text{ м} \quad (71)$$

Индукция в ярме статора:

$$B_a = \frac{\Phi}{2h'_a l_{ст} k_{c1}} \quad (72)$$

$$B_a = \frac{0,022}{2 \cdot 73 \cdot 10^{-3} \cdot 0,103 \cdot 0,95} = 1,56 \text{ Тл}$$

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов:

$$h'_a = h_a = 0,073 \text{ м} \quad (73)$$

По [12, табл. П1.9] $H_a = 1130 \text{ Тл}$.

Тогда:

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	Лист
						46
Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

$$F_a = 0,701 \cdot 1130 = 792,687 \text{ A}$$

Магнитное напряжение ярма ротора:

$$F_j = L_j H_j \quad (74)$$

где L_j – длина средней силовой линии в ярме ротора.

$$h_j = \frac{D_2 - D_j}{2} - h_{п2} = 18 \text{ мм} \quad (75)$$

$$L_j = \frac{\pi(D_j + h_j)}{2p} = 472 \text{ мм} \quad (76)$$

Индукция в ярме ротора:

$$B_j = \frac{\Phi}{2h_j l_{ст} k_{с2}} \quad (77)$$

$$B_j = \frac{0,022}{2 \cdot 18 \cdot 10^{-3} \cdot 0,103 \cdot 0,95} = 1,4 \text{ Тл}$$

По [12, табл. П1.9] напряженность ярма ротора $H_j = 656 \text{ Тл}$.

Тогда:

$$F_j = 472 \cdot 10^{-3} \cdot 656 = 309,841 \text{ A}$$

Магнитное напряжение на пару полюсов:

$$F_{ц} = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_j = 4188 \quad (78)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\mu} = \frac{F_{ц}}{F_{\delta}} \quad (79)$$

$$k_{\mu} = \frac{4188}{1946} = 2,152$$

Намагничивающий ток:

$$I_{\mu} = \frac{pF_{\Sigma}}{0,9m_1w_1k_{об1}} \quad (80)$$

$$I_{\mu} = \frac{3 \cdot 4188}{0,9 \cdot 3 \cdot 48 \cdot 0,91} = 35,514 \text{ А}$$

Относительное значение тока намагничивания:

$$I_{\mu*} = \frac{I_{\mu}}{I_{НОМ}} \quad (81)$$

$$I_{\mu*} = \frac{35,514}{199,124} = 0,178$$

Полученное значение, находится ниже предела 0,2...0,3 А, из этого можно сказать что материалы использованные в машине недоиспользуются.

3.6 Параметры рабочего режима

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора r_1, x_1 , ротора r_2, x_2 или приведенные к числу витков обмотки статора сопротивления ротора r'_2, x'_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчетное сопротивление r_{12} , введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Активное сопротивление обмотки статора:

$$r_1 = k_R \rho_{115} \frac{L_1}{q_{\Sigma\phi} a} \quad (82)$$

(Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура $v_{расч} = 115^{\circ}\text{C}$; для медных проводников $\rho_{115} = 10^{-6}/41 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; k_R – коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока, примем $k_R = 1$)

Длина проводников фазы обмотки:

$$L_1 = l_{cp1} w_1 \quad (83)$$

$$b_{\text{КТ}} = \frac{\pi(D + h_{\text{П1}})}{2p} \beta \quad (84)$$

$$b_{\text{КТ}} = \frac{\pi(0,286 + 44 \cdot 10^{-3})}{2} 0,8 = 0,414 \text{ м}$$

Длина пазовой части равна длине сердечника машины: $l_{\text{П1}} = l_1$

Для насыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус $B=0,015$ м.

По [12, табл. 9.23] $K_{\text{Л}} = 1,2$, $K_{\text{ВЫЛ}} = 0,26$.

Длина лобовой части:

$$l_{\text{Л}} = K_{\text{Л}} b_{\text{КТ}} + 2B \quad (85)$$

$$l_{\text{Л}} = 1,2 \cdot 0,414 + 2 \cdot 0,015 = 0,527 \text{ м}$$

Средняя длина витка:

$$l_{\text{СР}} = 2(l_{\text{П1}} + l_{\text{Л}}) \quad (86)$$

$$l_{\text{СР}} = 2(0,103 + 0,527) = 1,26 \text{ м}$$

Тогда:

$$L_1 = 1,26 \cdot 48 = 60,495 \text{ м}$$

$$r_1 = 1 \cdot \frac{10^{-6}}{41} \frac{60,495}{4,36 \cdot 10^{-6} \cdot 10 \cdot 1} = 0,034 \text{ Ом}$$

Длина вылета лобовых частей обмотки:

$$l_{\text{ВЫЛ}} = K_{\text{ВЫЛ}} b_{\text{КТ}} + B \quad (87)$$

$$l_{\text{ВЫЛ}} = 0,5 \cdot 0,414 + 0,015 = 0,123 \text{ м}$$

Относительное значение r_1 :

$$r_{1*} = r_1 \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} = 0,034 \cdot \frac{199,124}{220} = 0,031$$

Активное сопротивление фазы медной обмотки ротора:

$$r_2 = r_c + \frac{2r_{кл}}{\Delta^2} \quad (88)$$

где:

$$r_c = \rho_{115} k_r \frac{l_2}{q_c} \quad (89)$$

$$r_c = 10^{-6} / 41 \frac{0,103}{4,038 \cdot 10^{-4}} = 1,246 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

$$r_{кл} = \rho_{115} \frac{\pi D_{кл.ср}}{Z_2 q_{кл}} \quad (90)$$

$$r_{кл} = 10^{-6} / 41 \frac{\pi \cdot 0,2}{44 \cdot 3 \cdot 10^{-4}} = 2,319 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

(для литой медной обмотки ротора $\rho_{115} = \frac{10^6}{41} \text{ Ом} \cdot \text{м}$)

Тогда:

$$r_2 = 1,246 \cdot 10^{-5} + \frac{2 \cdot 2,319 \cdot 10^{-7}}{0,143^2} = 3,525 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора:

$$r'_2 = r_2 \frac{4m_1(w_1 k_{об1})^2}{Z_2 k_{ск1}^2} \quad (91)$$

$$r'_2 = 3,525 \cdot 10^{-5} \frac{4 \cdot 3(36 \cdot 0,91)^2}{44 \cdot 1} = 0,018 \text{ Ом}$$

Относительное значение:

$$r'_{2*} = r'_2 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (92)$$

$$r'_{2*} = 0,018 \frac{199,124}{220} = 0,0166$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$x_1 = 15,8 \frac{f_1}{100} \left(\frac{w_1}{100} \right)^2 \frac{l'_\delta}{pq} (\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{л1}} + \lambda_{\text{д1}}) \quad (93)$$

где по [12, табл. 9.26 (см. рис 9.50,е)]:

$$\lambda_{\text{п1}} = \frac{h_2}{3b_1} k_\beta + \left(\frac{h'_1}{b_1} + \frac{3h_{\text{к}}}{b_1 + 2b_{\text{ш}}} + \frac{h_{\text{ш}}}{b_{\text{ш}}} \right) k'_\beta \quad (94)$$

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{п1}} &= \frac{0,036 \cdot 0,888}{3 \cdot 15,5 \cdot 10^{-3}} + \left(\frac{3 \cdot 10^{-3}}{15,5 \cdot 10^{-3}} + \frac{3 \cdot 3,2}{15,5 + 2 \cdot 3,785} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{15,5 \cdot 10^{-3}} \right) 0,85 \\ &= 1,381 \end{aligned}$$

где $h_2 = h_{\text{п}} - h_{\text{ш}} - h_{\text{к}} - h'_{\text{к}} = 36 \cdot 10^{-3}$ м, $k'_\beta = 0,25(1 + 3\beta) = 0,85$ $k_\beta = 0,25(1 + 3k'_\beta) = 0,888$ (при $\beta = 0,8$), $h'_1 = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $l'_\delta = l_\delta = 0,103$ м.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \frac{q}{l'_\delta} (l_{\text{л}} - 0,64\beta\tau) \quad (95)$$

$$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \frac{6}{0,103} (0,527 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,449) = 5,873$$

Для $\frac{t_{z2}}{t_{z1}} = 1,235$ и так как скос пазов отсутствует $\beta_{\text{СК}} = 1$, по [12, рис.9.51д]

$$k'_{\text{СК}} = 2.$$

$$\xi = 2k'_{\text{CK}}k_{\beta} - k_{\text{об1}}^2 \left(\frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 (1 + \beta_{\text{CK}}^2) \quad (96)$$

$$\xi = 2 \cdot 2 \cdot 0,8 - 0,91^2 (1,235)^2 (1 + 0,8^2) = 1,023$$

Тогда коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{t_{z1}}{12\delta k_{\delta}} \xi \quad (97)$$

$$\lambda_{\text{д1}} = \frac{25 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 15 \cdot 10^{-4} \cdot 1,092} 1,071 = 1,324$$

Тогда:

$$x_1 = 15,8 \frac{50}{100} \left(\frac{36}{100} \right)^2 \frac{0,103}{1 \cdot 6} (1,381 + 5,873 + 1,324) = 0,268 \text{ Ом}$$

Относительное значение:

$$x_{1*} = x_1 \frac{I_{\text{1НОМ}}}{U_{\text{1НОМ}}} \quad (98)$$

$$x_{1*} = 0,268 \frac{199,124}{220} = 0,243$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 f_1 l'_{\delta} (\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{л2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{СК}}) 10^{-6} \quad (99)$$

где по [12, табл.9.27 и рис. 9.52а]:

$$\lambda_{\text{п2Н}} = \left(\frac{h'_{\text{В}}}{3b_{\text{В}}} + \frac{3b_{\text{В}}}{2b_{\text{В}} + 4h'_{\text{Ш}}} \right) \cdot k_{\text{д}} + 0,3 + 1,12 \cdot 10^6 \cdot \frac{h'_{\text{Ш}}}{I_2} = 3,644$$

$$\lambda_{\text{п2В}} = \left[\frac{h_{02}}{3b_{1\text{Н}}} \left(1 - \frac{\pi b_{1\text{Н}}^2}{8q_c} \right) \cdot k + 0,66 - \frac{b_{\text{В}}}{2b_{1\text{Н}}} \right] = 2,286$$

$$\lambda_{п2} = \lambda_{п2Н} + \lambda_{п2В} = 5,93 \quad (100)$$

где $h_0 = 57 \cdot 10^{-3}$ м, при расчете номинального режима $k_d = 1$.

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3D_{кл.ср}}{Z_2 l'_{\delta} \Delta^2} \lg \left(\frac{4,7D_{кл.ср}}{h_{кл} + 2b_{кл}} \right) \quad (101)$$

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot 0,2}{44 \cdot 0,103 \cdot 0,143^2} \lg \left(\frac{4,7 \cdot 0,2}{83 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 36 \cdot 10^{-3}} \right) = 0,554$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора:

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{z2}}{12\delta k_{\delta}} \xi \quad (102)$$

$$\xi = 1$$

(103)

Так как пазы закрытые $\Delta_z = 0$

$$\lambda_{д2} = \frac{0,0202}{12 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 1,071} 1 = 1,048$$

$$\lambda_{ск} = \frac{t_{z2}\beta}{12k_{\mu}k_{\delta}}$$

$$\lambda_{ск} = \frac{0,0202 \cdot 0,8}{12 \cdot 2,152 \cdot 1,071} = 7,302 \cdot 10^{-4}$$

Тогда:

$$\begin{aligned} x_2 &= 7,9 \cdot 50 \cdot 0,194(5,93 + 0,554 + 1,048 + 7,302 \cdot 10^{-4})10^{-6} \\ &= 3,069 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \end{aligned}$$

Приводим x_2 к числу витков статора:

$$x'_2 = x_2 \frac{4m_1(w_1 k_{061})^2}{Z_2 k_{ск1}^2} \quad (104)$$

$$x'_{2} = 3,069 \cdot 10^{-4} \frac{4 \cdot 3(36 \cdot 0,91)^2}{44 \cdot 1^2} = 0,16 \text{ Ом}$$

Относительное значение:

$$x'_{2*} = x'_{2} \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_{1\text{НОМ}}} \quad (105)$$

$$x'_{2*} = 0,16 \frac{199,124}{220} = 0,145$$

3.7 Расчет потерь

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

Потери в стали основные:

$$P_{\text{ст.осн}} = p_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^{\beta} (k_{\text{да}} B_a^2 m_a + k_{\text{дз}} B_{z1}^2 m_{z1}) \quad (106)$$

где $p_{1,0/50}$ – удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц (по [1, табл.9.28] $p_{1,0/50} = 1,75$ Вт/кг); $k_{\text{да}}$ и $k_{\text{дз}}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов (для машин небольшой мощности можно принять $k_{\text{да}} = 1,6$ и $k_{\text{дз}} = 1,8$); m_a и m_{z1} – масса стали ярма и зубцов статора.

$$m_a = \pi(D_a - h_a)h_a l_{\text{ст}} k_{c1} \gamma_c = 6,79 \cdot 10^3 \text{ кг} \quad (107)$$

$$m_{z1} = h_{z1} b_{z1\text{ср}} Z_1 l_{\text{ст}} k_{c1} \gamma_c = 3,033 \cdot 10^3 \text{ кг} \quad (108)$$

где γ_c – удельная масса стали; в расчетах принимают $\gamma_c = 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³

Тогда:

$$P_{\text{ст.очн}} = 1,75 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,3} \cdot (1,4 \cdot 1,6^2 \cdot 6,8 \cdot 10^3 + 1,2 \cdot 1,983^2 \cdot 3,033 \cdot 10^3)$$

$$= 12,214 \text{ кВт}$$

Поверхностные потери в роторе:

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} t_{z2} Z_2 l_{\text{ст2}} \quad (109)$$

где $p_{\text{пов2}}$ – удельные поверхностные в роторе:

$$p_{\text{пов2}} = 0,5 k_{02} \left(\frac{Z_1 n}{10000}\right)^{1,5} (B_{02} t_{z1} \cdot 10^3)^2 \quad (110)$$

где k_{02} – коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери (примем $k_{02} = 1,5$).

$$B_{02} = \beta_{02} k_{\delta} B_{\delta} \quad (111)$$

По [12, рис 9.53] $\beta_{02} = 0,2$

Тогда:

$$B_{02} = 0,2 \cdot 1,071 \cdot 0,761 = 0,163 \text{ Тл}$$

$$n = n_0 = \Omega \frac{60}{2\pi} \quad (112)$$

$$n = n_0 = 314,159 \frac{60}{2\pi} = 3000 \text{ об/мин}$$

$$p_{\text{пов2}} = 0,5 \cdot 1,5 \left(\frac{516 \cdot 35}{10000}\right)^{1,5} (0,2 \cdot 0,055 \cdot 10^3)^2 = 5,744 \cdot 10^3 \text{ Вт/м}^2$$

$$P_{\text{пов2}} = 440,744 \cdot 0,0202 \cdot 44 \cdot 0,103 = 40,42 \text{ Вт}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора:

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \left(\frac{Z_1 n}{1000} B_{\text{пул2}}\right)^2 m_{z2} \quad (113)$$

где $B_{\text{пул2}}$ – амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора:

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \delta}{2t_{z2}} B_{z2\text{cp}} \quad (114)$$

$$B_{\text{пул2}} = \frac{1,109 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 20,2 \cdot 10^{-3}} 2,065 = 0,085 \text{ Тл}$$

m_{z2} – масса стали зубцов ротора:

$$m_{z2} = Z_2 h_{z2} b_{z2\text{cp}} l_{\text{ст}} k_{c1} \gamma_c \quad (115)$$

$$m_{z2} = 44 \cdot 0,066 \cdot 11 \cdot 10^{-3} \cdot 0,103 \cdot 0,95 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3} = 24,125 \text{ кг}$$

Тогда:

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \left(\frac{54 \cdot 3000}{1000} 0,086 \right)^2 24,125 = 3,509 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Сумма добавочных потерь в стали:

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул2}} = 9,253 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad (116)$$

Полные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст.осн}} + P_{\text{ст.доб}} = 21,321 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad (117)$$

Механические потери:

$$P_{\text{мех}} = K_T (10 \cdot D_a)^3 = 8,912 \cdot 10^3 \text{ Вт} \quad (118)$$

$$K_T = 0,01 \quad (119)$$

Холостой ход двигателя:

$$I_{\text{х.х}} = \sqrt{I_{\text{х.х.а}}^2 + I_{\mu}^2} \quad (120)$$

где $I_{\text{х.х.а}}$ – активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{\text{х.х.а}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{элх.х}}}{mU_{1\text{ном}}} \quad (121)$$

$P_{\text{элх.х}}$ – электрические потери в статоре при холостом ходу:

$$P_{\Sigma 1x.x} = mI_{\mu}^2 r_1 \quad (122)$$

$$P_{\Sigma 1x.x} = 3 \cdot 35,514^2 \cdot 3 = 12,045 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Тогда:

$$I_{x.x.a} = \frac{1059 + 210,912 + 128,045}{3 \cdot 220} = 2,118 \text{ А}$$

$$I_{x.x} = \sqrt{2,118^2 + 35,514^2} = 35,577 \text{ А}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos \varphi_{x.x} = \frac{I_{x.x.a}}{I_{x.x}} \quad (123)$$

$$\cos \varphi_{x.x} = \frac{2,118}{35,514} = 0,06$$

3.8 Расчет рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости $P_1, I_1, \cos \varphi, \eta, s_1 = f(P_2)$. Часто к ним относят также зависимости $M = f(P_2)$ и I_2 или $I'_2 = f(P_2)$.

Параметры:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{ст.очн}}}{mI_{\mu}^2} \quad (124)$$

$$r_{12} = \frac{684,932}{3 \cdot 35,514^2} = 0,181 \text{ Ом}$$

$$x_{12} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{I_{\mu}} - x_1 \quad (125)$$

$$x_{12} = \frac{220}{35,514} - 0,268 = 5,926 \text{ Ом}$$

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}} \quad (126)$$

$$c_1 \approx 1 + \frac{0,268}{0,181} = 1,045$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ст.осн}} + 3I_{\mu}^2 r_1}{3U_{1\text{НОМ}}} \quad (127)$$

$$I_{0a} = \frac{684,932 + 3 \cdot 35,514^2 \cdot 0,034}{3 \cdot 220} = 1,232 \text{ А}$$

$$\begin{cases} a' = c_1^2 & a = c_1 r_1 \\ b' = 0 & b = c_1(x_1 + c_1 x'_2) \end{cases} \quad (128)$$

$$a' = 1,045^2 = 1,093$$

$$a = 1,045 \cdot 0,034 = 0,035 \text{ Ом}$$

$$b' = 0$$

$$b = 1,093 \cdot (0,268 + 1,045 \cdot 0,16) = 0,455 \text{ Ом}$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 21,321 \cdot 10^3 + 8,912 \cdot 10^3 = 20,233 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений $s=0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03$, принимая предварительно, что $s_{\text{НОМ}} \approx r'_{2*} = 0,0166$.

Таблица 8.1 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики построены на рисунке 8.1.

№ п/п	Расчетная формула	Размерность	Скольжение, s						
			,005	,01	,015	,0166	,02	,025	,03
1	$a'r'_2/s$	Ом	,008	,004	,336	,207	,002	,802	,688
2	$R = a + a'r'_2/s$	Ом	,043	,039	,371	,243	,037	,837	,703
3	$X = b + b'r'_2/s$	Ом	,455	,455	,455	,455	,455	,455	,455
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	,069	,089	,445	,323	,133	,953	,838
5	$I''_2 = U_1/Z$	А	4,07	05,289	52,261	66,251	94,21	30,925	62,605
6	$\cos\varphi'_2 = R/Z$	-	,994	,976	,949	,939	,916	,879	,84
7	$\sin\varphi'_2 = X/Z$	-	,112	,218	,315	,34	,402	,478	,543
8	$I_{1a} = I_{0a} + I''_2 \cos\varphi'_2$	А	4,962	03,993	45,742	57,341	79,079	04,103	21,708
9	$I_{1p} = I_{0p} + I''_2 \sin\varphi'_2$	А	1,562	8,447	3,473	2,691	13,54	45,829	78,174
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	8,907	19,292	67,954	82,614	12,039	50,847	84,43
11	$I'_2 = c_1 I''_2$	А	6,519	10,08	59,158	73,782	03,007	41,385	74,501
12	$P_1 = 3U_1 I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	60,275	68,635	56,16	43,845	58,192	74,708	66,327
13	$P_{31} = 3I_{1p}^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	12,482	11,445	12,864	12,386	12,565	12,388	12,213
14	$P_{32} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	4,159	4,603	4,261	4,504	4,052	4,902	4,752
15	$P_{доб} = 0,005P_1$	кВт							

			,181	,343	,481	,519	,59	,674	,32
16	ΣP $= P_{\text{CT}} + P_{\text{Мех}}$ $+ P_{\text{Э2}} + P_{\text{Э1}}$ $+ P_{\text{Доб}}$	кВт	36,093	38,661	37,876	35,679	34,478	39,234	40,967
17	$P_2 = P_1 - \Sigma P$	кВт	24,182	29,974	18,284	8,166	22,513	35,474	25,36
18	$\eta = 1 - \Sigma P / P_1$	-	,972	,957	,949	,956	,948	,937	,925
19	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$	-	,798	,872	,868	,862	,845	,814	,779

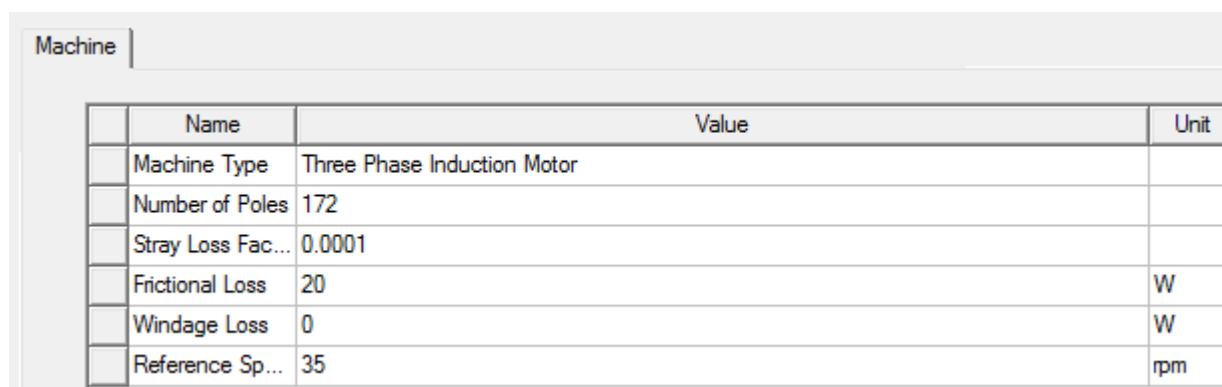
4 СПЕЦИАЛЬНАЯ ЧАСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТА

4.1 Моделирование двигателя в программной среде Ansys Electronics

Desktop

Моделирование двигателя производится в инструменте Rmxprt Design, выбирается тип машины – Three-Phase induction motor (Трехфазный асинхронный двигатель). Первым этапом является расчет электрической машины. Задаются параметры машины, геометрия статора, геометрия пазов статора, параметры обмотки статора, геометрия ротора. Геометрия полюсов ротора, материал постоянного магнита и его толщина задаются произвольно, в соответствии с геометрией ротора, впоследствии эти параметры, как и геометрия машины могут корректируются для получения необходимых характеристик двигателя.

Параметры машины представлены на рис.17.



Name	Value	Unit
Machine Type	Three Phase Induction Motor	
Number of Poles	172	
Stray Loss Fac...	0.0001	
Frictional Loss	20	W
Windage Loss	0	W
Reference Sp...	35	rpm

Рис. 17. Параметры электрической машины

Потери на трение в подшипниках (Frictional Loss) принимаются равными 20, Потери на вентиляцию (Windage Loss) пренебрежимо малы, поэтому принимаются равными нулю.

Геометрические размеры статора представлены на рис.18. Коэффициент заполнения сталью (Stacking Factor) принимается равным 0,92. Величина скоса пазов (Skew Width) принимается равной одному. В библиотеке материалов Ansys обозначена выбираем материал статора D23_50.

Stator				
Name	Value	Unit	Evaluated Value	
Outer Diameter	9400	mm	9400mm	
Inner Diameter	9000	mm	9000mm	
Length	250	mm	250mm	
Stacking Factor	0.92			
Steel Type	D23_50			
Number of Slots	516			
Slot Type	6			
Lamination Se...	0			
Press Board T...	0	mm		
Skew Width	1		1	

Рис. 18. Геометрия статора

Геометрические размеры пазов статора представлены на рис. 19. Эскиз паза представлен на рис. 20.

Slot				
Name	Value	Unit	Evaluated Value	
Auto Design	<input type="checkbox"/>			
Hs0	1	mm	1mm	
Hs1	1	mm	1mm	
Hs2	77	mm	77mm	
Bs1	15	mm	15mm	
Bs2	15	mm	15mm	

Рис. 19. геометрические размеры пазов статора

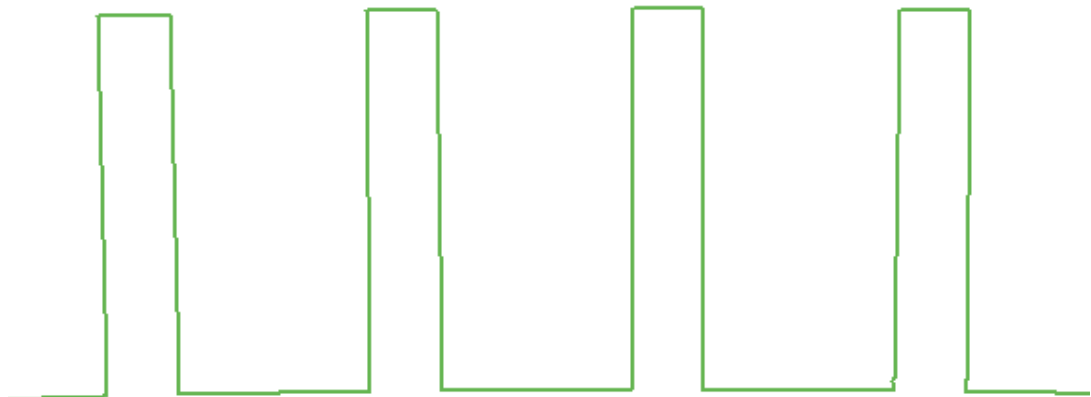


Рис. 20. Эскиз паза

Параметры обмотки статора представлены на рис. 21.

Winding		End/Insulation		
Name	Value	Unit	Evaluated Value	
Winding Layers	1			
Winding Type	Whole-Coiled			
Parallel Branch...	1			
Conductors pe...	0		0	
Number of Stra...	0		0	
Wire Wrap	0.1	mm		
Wire Size	Width:22.4mm Thickness:3.15mm			

Рисунок 21. Параметры обмотки статора

Эскиз распределения обмоток в пазах статора представлен на рис. 22.

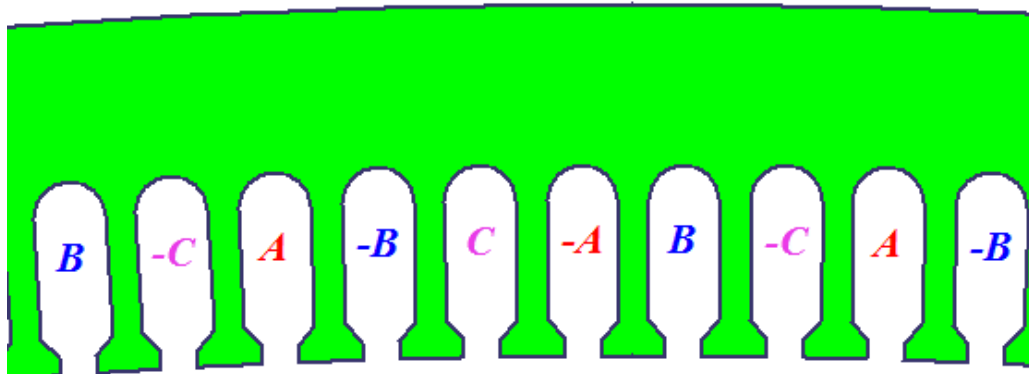


Рисунок 22. Распределение обмоток в пазах статора

Параметры ротора представлены на рис. 23. Ротор изготавливается из стали D23_50.

Rotor				
Name	Value	Unit	Evaluate...	
Stacking Factor	0.92			
Number of Slots	576			
Slot Type	4			
Outer Diameter	9000-2	mm	8998mm	
Inner Diameter	7000	mm	7000mm	
Length	250	mm	250mm	
Steel Type	D23_50			
Skew Width	0			
Cast Rotor	<input checked="" type="checkbox"/>			
Half Slot	<input type="checkbox"/>			

Рисунок 23. Параметры ротора

Эскиз слота ротора асинхронного трехфазного двигателя представлен на рис. 24.

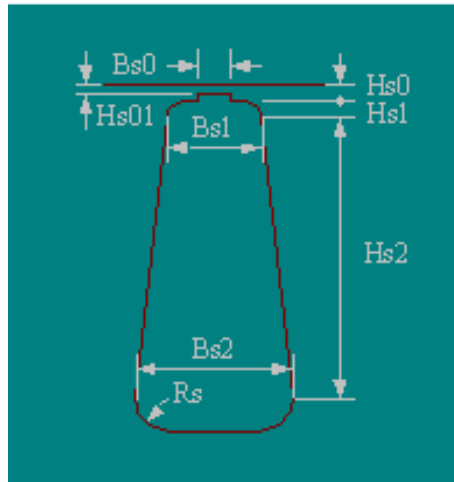


Рисунок 24. Эскиз слота ротора асинхронного трехфазного
Геометрические размеры слота ротора представлены на рис. 25.

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Hs0	1	mm	1mm
Hs01	0.5	mm	0.5mm
Hs1	0.5	mm	0.5mm
Hs2	100	mm	100mm
Bs0	1	mm	1mm
Bs1	20	mm	20mm
Bs2	20	mm	20mm
Rs	1	mm	1mm

Рисунок 25 Геометрические размеры слота ротора

Параметры обмотки ротора представлены на рис. 26. Тип проводника выбираем в библиотеке материалов Ansys- cast_aluminum_75C

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Bar Conductor ...	cast_aluminum_75C		
End Length	0	mm	0mm
End Ring Width	200	mm	200mm
End Ring Height	100	mm	100mm
End Ring Con...	cast_aluminum_75C		

Рисунок 26 Параметры обмотки ротора

После задания основных параметров машины, необходимо задать требуемые характеристики машины, исходя из которых, программа будет проводить расчеты. Данные характеристики представлены на рис. 27.

General IndM3		Name	Value	Unit	Evaluated Value	Description
	Name	Setup1				
	Enabled	<input checked="" type="checkbox"/>				
	Operation Type	Motor				Motor or generator
	Load Type	Const Power				Mechanical load type
	Rated Output ...	1375		kW	1375kW	Rated mechanical or el...
	Rated Voltage	6		kV	6kV	Applied or output rated ...
	Rated Speed	35		rpm	35rpm	Given rated speed
	Operating Tem...	75		cel	75cel	Operating temperature

Рисунок 27. Требуемые характеристики машины

Расчетные массы активных материалов, использованных в машине, представлены на рис. 28. Масса алюминия составила 2282 кг, масса постоянных магнитов – 3018 кг, масса стали статора – 9297 кг, масса стали ротора – 114422 кг. Большая масса стали ротора объясняется необходимостью наличия большой инерционной массы у двигателя.

MATERIAL CONSUMPTION	
Armature Copper Density (kg/m ³):	8900
Rotor Bar Material Density (kg/m ³):	2700
Rotor Ring Material Density (kg/m ³):	2700
Armature Core Steel Density (kg/m ³):	7820
Rotor Core Steel Density (kg/m ³):	7820
Armature Copper Weight (kg):	2282.98
Rotor Bar Material Weight (kg):	789.25
Rotor Ring Material Weight (kg):	3018.34
Armature Core Steel Weight (kg):	9297.09
Rotor Core Steel Weight (kg):	43049.9
Total Net Weight (kg):	58437.5
Armature Core Steel Consumption (kg):	44603.8
Rotor Core Steel Consumption (kg):	114422

Рисунок 28. Расчетные массы активных материалов

Номинальные данные двигателя представлены на рис.29

RATED-LOAD OPERATION	
Stator Resistance (ohm):	0.119636
Stator Resistance at 20C (ohm):	0.09841
Stator Leakage Reactance (ohm):	3.78191
Rotor Resistance (ohm):	0.0605389
Rotor Leakage Reactance (ohm):	5.13352
Resistance Corresponding to Iron-Core Loss (ohm):	1186.75
Magnetizing Reactance (ohm):	34.1318
Stator Phase Current (A):	196.02
Current Corresponding to Iron-Core Loss (A):	2.48304
Magnetizing Current (A):	86.334
Rotor Phase Current (A):	156.133
Copper Loss of Stator Winding (W):	13790.6
Copper Loss of Rotor Winding (W):	4427.36
Iron-Core Loss (W):	21950.6
Frictional and Windage Loss (W):	20
Stray Loss (W):	137.5
Total Loss (W):	40326.1
Input Mechanical Power (kW):	1332.66
Output Electrical Power (kW):	1292.33
Mechanical Shaft Torque (N.m):	363598
Efficiency (%):	96.974
Power Factor:	0.634463
Rated Slip:	-0.00333333
Rated Shaft Speed (rpm):	35

Рисунок 29. Номинальные данные двигателя

В результате расчета асинхронной машины получены следующие зависимости: КПД от скорости, выходной электрической мощности от скорости, коэффициента мощности от скорости, крутящего момента от скорости, фазного тока от выходной мощности, КПД от выходной мощности, коэффициента мощности от выходной мощности, скольжения от выходной мощности, крутящего момента от выходной мощности. Полученные зависимости приведены на рис. 30 – 38.

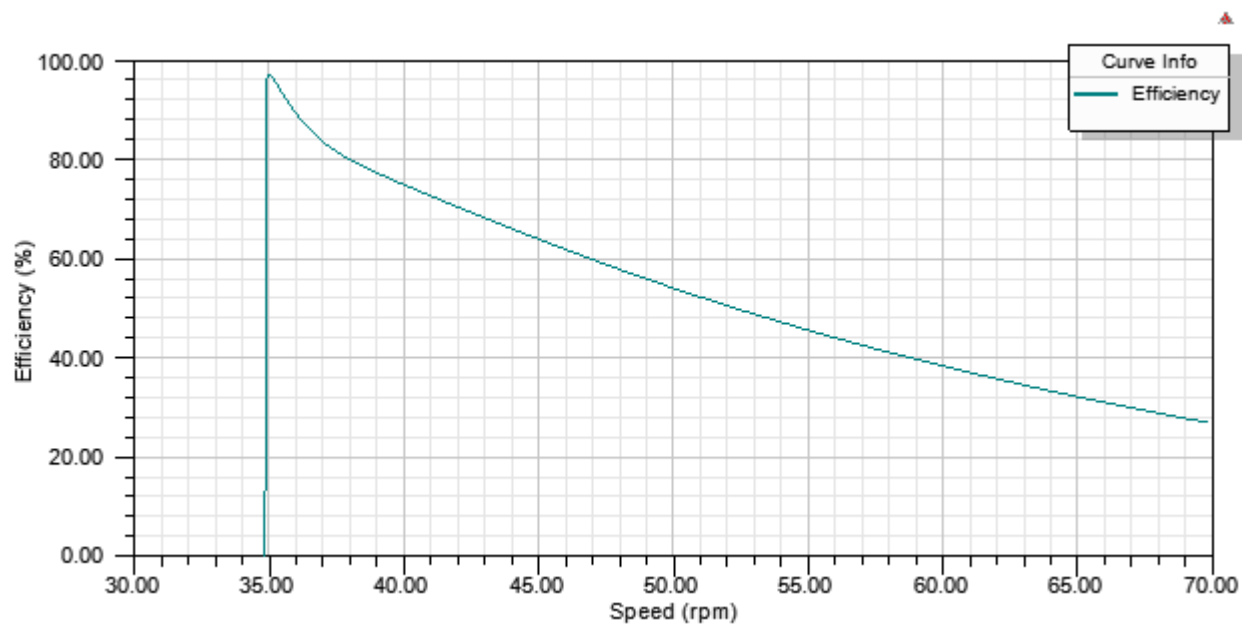


Рисунок 30. Зависимость КПД от скорости

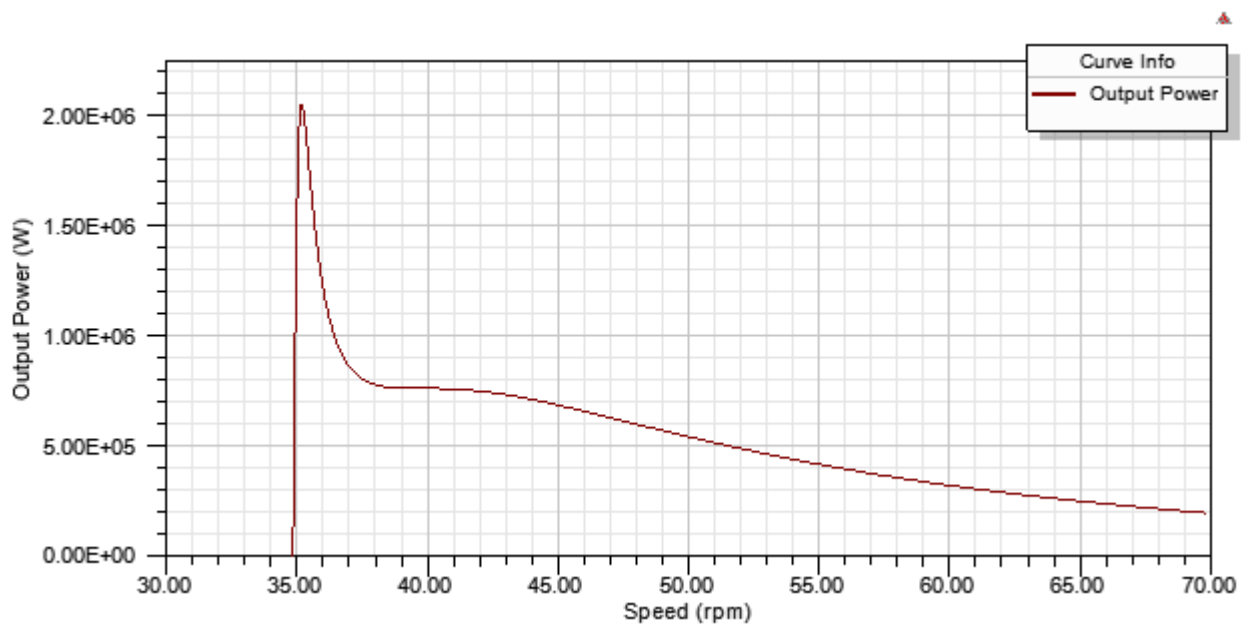


Рисунок 31. Зависимость выходной электрической мощности от скорости

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

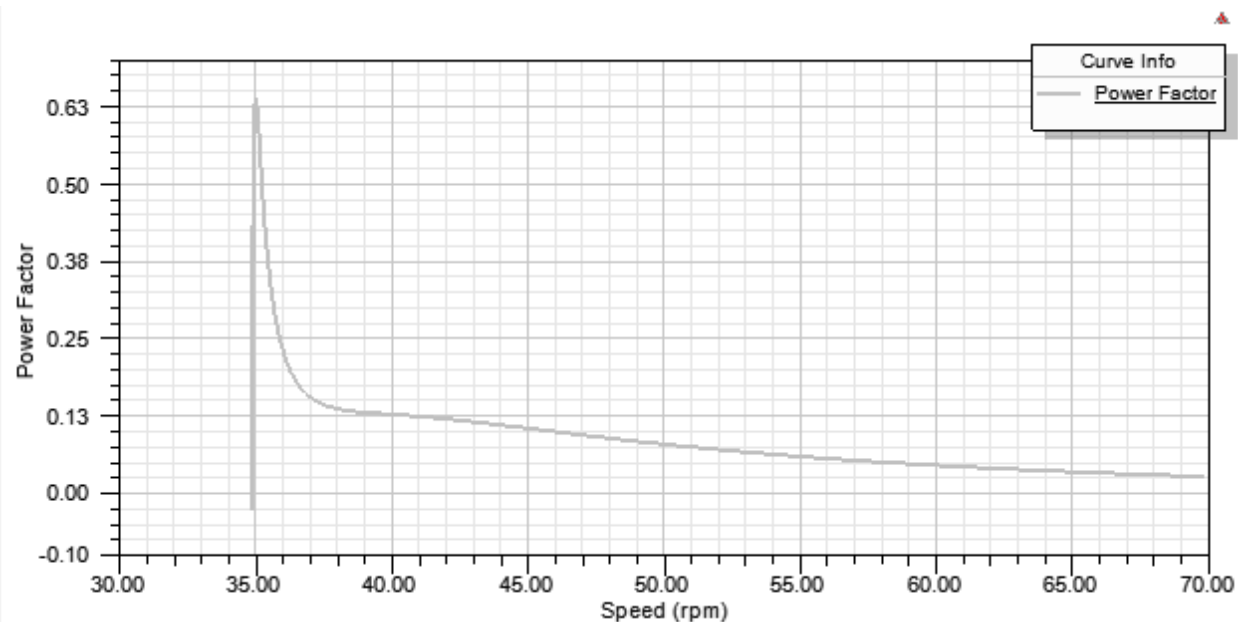


Рисунок 32. Зависимость коэффициента мощности от скорости

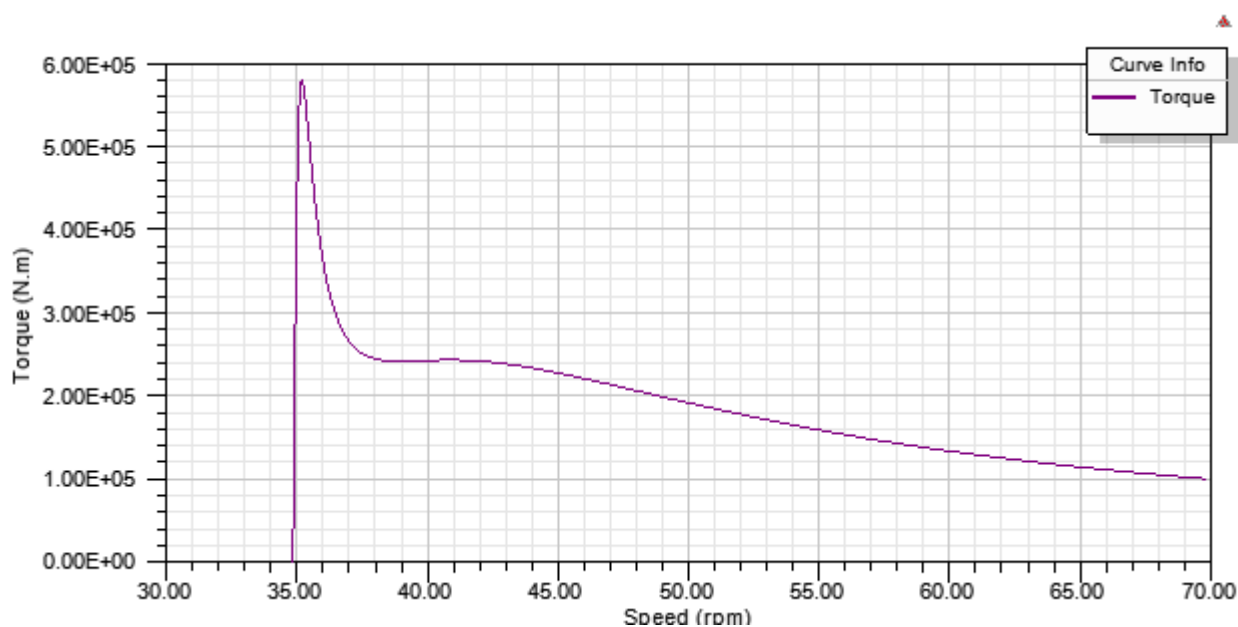


Рисунок 33. Зависимость крутящего момента от скорости

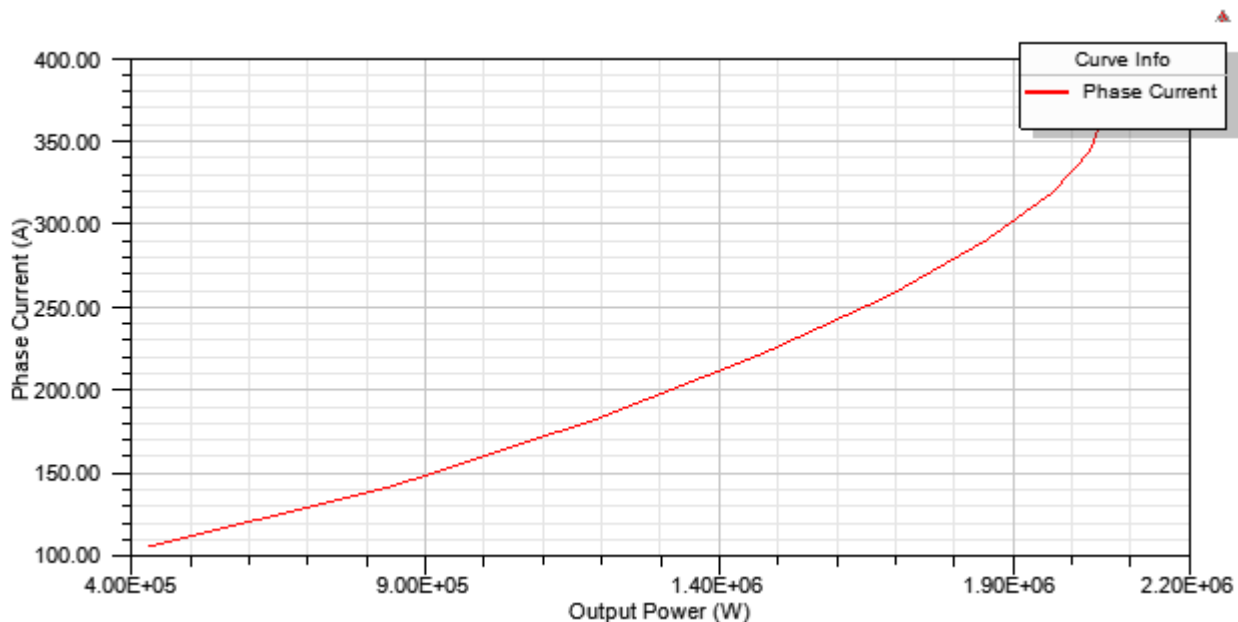


Рисунок 34. Зависимость фазного тока от выходной мощности.

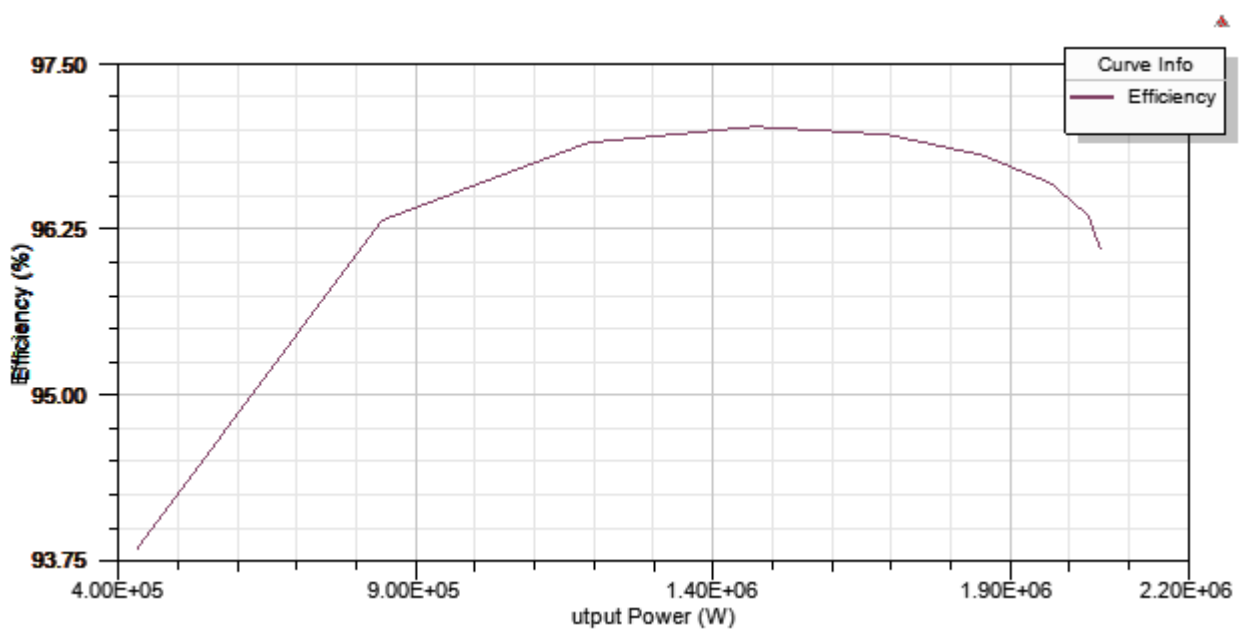


Рисунок 35. Зависимость КПД от выходной мощности.

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

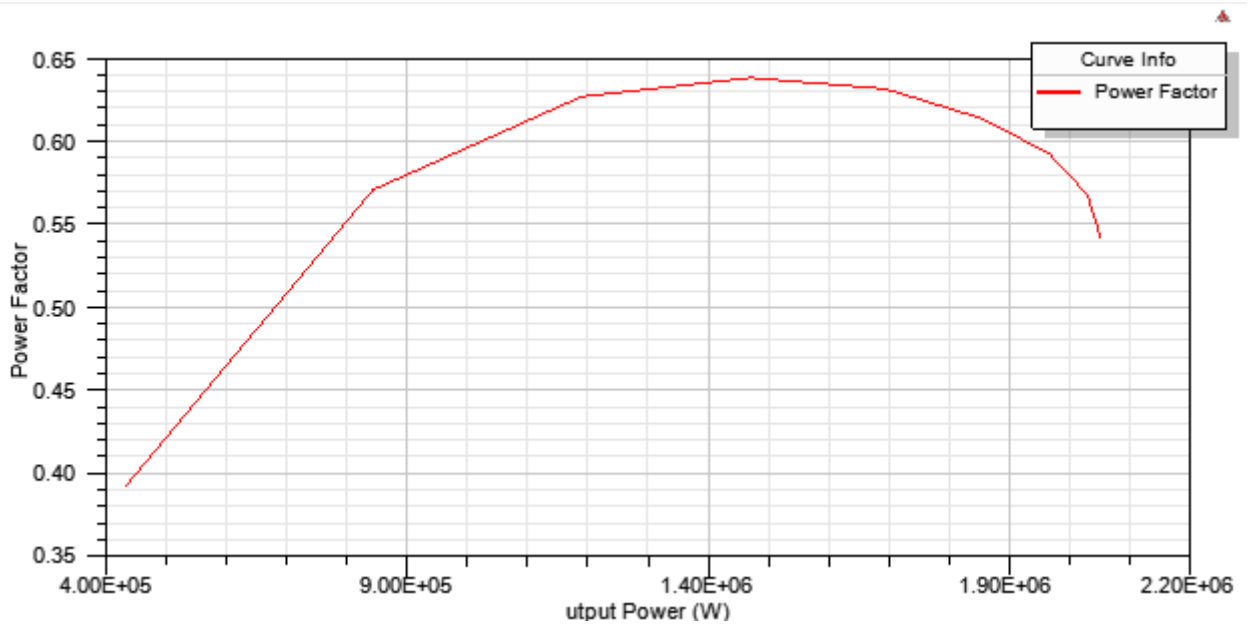


Рисунок 36. Зависимость коэффициента мощности от выходной мощности.

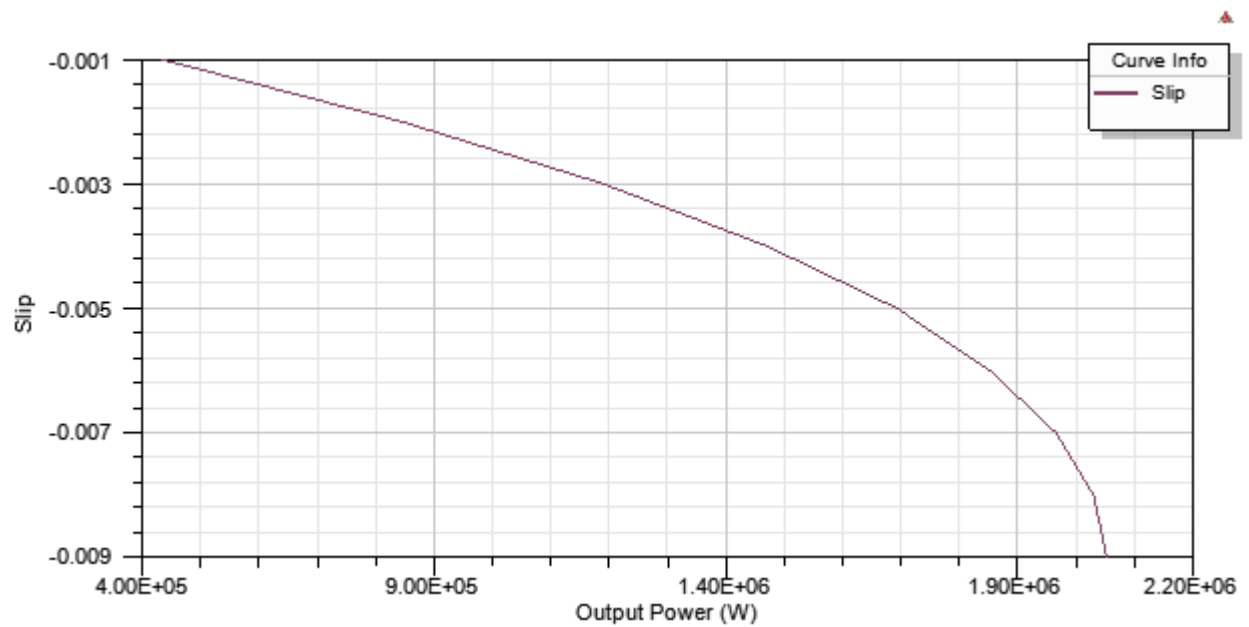


Рисунок 37. Зависимость скольжения от выходной мощности.

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

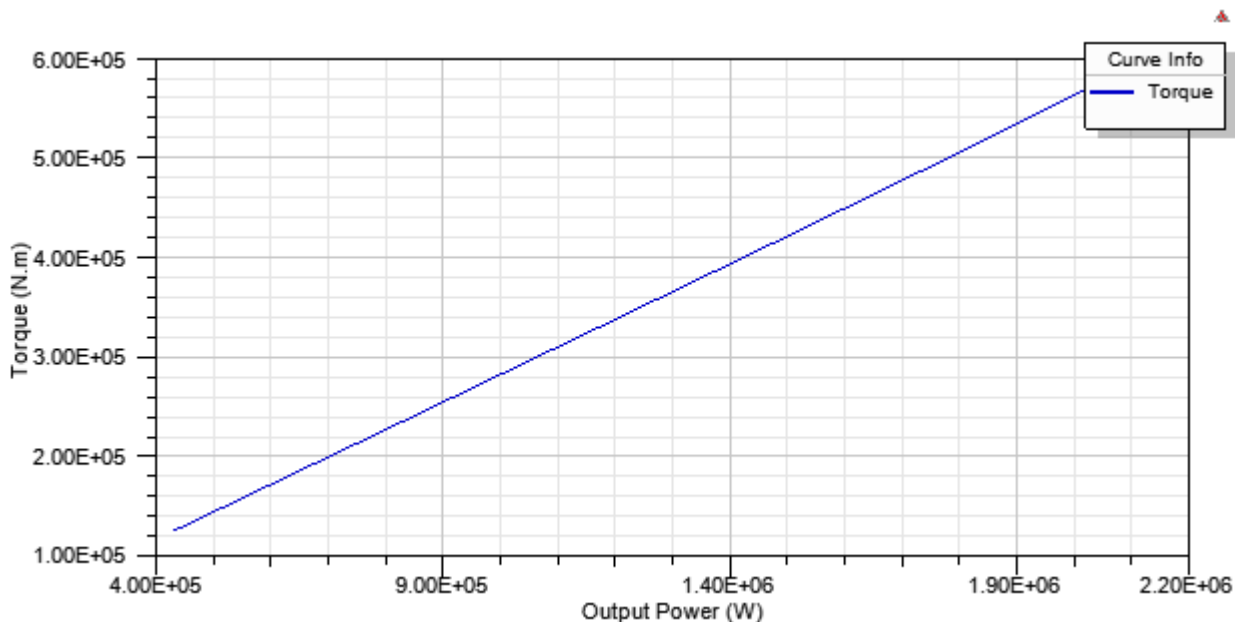


Рисунок 38. Зависимость крутящего момента от выходной мощности.

Изм/Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

130302.2019.171.ПЗ.ВКР

Лист

71

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения дипломного проекта были рассмотрены варианты для модернизации электрического привода для технологии проката бесшовных труб пилигримовым способом. В качестве основного (базового) варианта электрической машины для привода пильгерстана предлагается вариант с исключением существующего маховика и заменой его асинхронным двигателем большого диаметра с эквивалентной инерционной массой. Двигатель имеет номинальную мощность 1375 кВт и частоту вращения 35 об/мин. Питается электродвигатель от серийного управляемого частотного преобразователя. Габаритные размеры позволяют поставить аналогичный комплект на второй независимый привод пильгерстана.

Произведен расчет основных размеров двигателя, расчет обмоток для дальнейшего моделирования двигателя в системе автоматизированного проектирования Ansys Electronics Desktop.

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		72

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология и оборудование трубного производства: учебник для вузов / В.Я. Осадчий, А.С. Вавилин, В.Г. Зимовец, А.П. Коликов – М.: «Интермет Инжиниринг», 2001. – 608 с.
2. Сыромятников И.А. Режимы работы синхронных генераторов/ И.А. Сыромятников. – М.: Госэнергоиздат, 1952. 198 с.
3. Апсит В.В. Синхронные машины с когтеобразными полюсами/ В.В. Апсит. – Рига: Изд-во АН Латв. ССР, 1959. 300 с.
4. Куцевалов, В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами/ В.М. Куцевалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 161 с.
5. Сугробов А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов: учебное пособие для вузов/ А.М. Сугробов, А.М. Русаков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 304 с.
6. Сугробов А.М. Системы электроснабжения и электрозапуска автомобилей и тракторов: учебное пособие/ А.М. Сугробов, А.В. Бериллов, С.А. Грузков, И.В. Станкевич. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 96 с.
7. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: учебник для вузов. В двух томах. Том 2/ А.В. Иванов-Смоленский. – 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 532 с.
8. Гуляев И.В., Сравнительный обзор синхронного двигателя с постоянными магнитами и бесколлекторного двигателя постоянного тока при непосредственном управлении моментом / И.В., Гуляев А.В., Волков А.А., Попов Е.И., Ионова М.А. Бобров // Научно-технический вестник Поволжья. 2015. № 6. С. 123-128.
9. Предигер В. Автоматическое управление гибридной силовой установкой полноприводного автомобиля / В. Предигер, Й. Хоффманн, В. Трентманн, С. Костилов, Е. Ломан, В.В. Селифонон, К.Е. Карпухин, Е.Е. Баулина // Известия

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм/Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			73

московского государственного технического университета МАМИ. – 2009. – №1. – С. 60-67.

10. Опейко О.Ф. Тяговый электропривод с бездатчиковой системой векторного управления / О.Ф. Опейко, А.И. Пташкин, В.И. Хильмон // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ.–2010.–№6.–С.37-43.

11. Голландцев Ю.А. Сравнение механических характеристик асинхронных и вентильных индукторнореактивных двигателей // Информационно-управляющие системы. – 2006. – №6. – С. 50-53.

12. Проектирование электрических машин: учебник для вузов. / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2011. – 767 с.

13. Гуляев И.В. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя: монография / И.В. Гуляев, Г.М. Тутаев. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010.–200с.

14. Kovalev, K., Ivanov, N., Tulinova, E. Magnetic field distribution in the active zone of synchronous generators with electromagnetic excitation 2017 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2017 – Proceedings 8076353

15. Козаченко В.Ф. Вентильно-индукторный электропривод с независимым возбуждением для тягового применения / В.Ф. Козаченко, М.М. Лашкевич // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – №3. – С. 138-139.

16. Никифоров Б.В. Вентильно-индукторные двигатели для тяговых электроприводов / Б.В. Никифоров, С.А. Пахомин, Г.К. Птах // Электричество. – 2007. №2. – С. 34-38.

17. Туан Н.М. Основные достоинства реактивно-вентильных электродвигателей по сравнению с традиционными электродвигателями / Н.М. Туан, Н.Ч. Хай // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – №8. – С. 184-187.

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм/Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			74

18. Козаченко В.Ф. Электропривод на базе вентильных индукторных машин с электромагнитным возбуждением / В.Ф. Козаченко, Д.Е. Корпусов // Электронные компоненты. – 2005. – №6. – С. 60-64.

					<i>130302.2019.171.ПЗ.ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		75