

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Энергетический факультет
Кафедра «Автоматизированный электропривод»
Направление подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ
РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Рецензент, доцент, к.т.н.

_____/ Д.А. Сычев /
« ____ » _____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой
автоматизированного электропривода,
д.т.н., профессор

_____/ М.А. Григорьев /
« ____ » _____ 2020 г.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ В СТАЛИ НА УДЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ МАШИН И СИСТЕМУ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ**

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО ПРОГРАММЕ МАГИСТРАТУРЫ
«ЭЛЕКТРОПРИВОДЫ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ»
ЮУрГУ–13.04.02.2020.184 ВКР**

Руководитель, доцент, к.т.н.

_____/ А.Н. Горожанкин /
« ____ » _____ 2020 г.

Автор работы,
магистрант группы П–286

_____/ М.С. Семенова /
« ____ » _____ 2020 г.

Нормоконтролер, доцент, к.т.н.

_____/ Т.А. Функ /
« ____ » _____ 2020 г.

Челябинск
2020 г.

АННОТАЦИЯ

Семенова М.С. Исследование влияния потерь в стали на удельные показатели синхронных реактивных машин и систему управления электроприводом. – Челябинск: ЮУрГУ, П-286; с., 30 ил., 5 табл., библи. список – 27 наим.

Темой данной выпускной квалификационной работы является влияние потерь в стали в синхронной реактивной машине на систему управления и удельные показатели.

В проекте был изучен двигатель новой конструкции – синхронный реактивный двигатель, принцип его работы и особенности, рассмотрены различные виды потерь и природа их возникновения.

С помощью инструментов, заложенных в ANSYS Maxwell 2D была создана модель исследуемого двигателя. После необходимых настроек всех параметров были сняты характеристики потерь в различных режимах работы двигателя.

Далее были сделаны выводы по проделанной работе и даны рекомендации по выбору расчета потерь в программе ANSYS Maxwell 2D.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	<i>Исследование влияния потерь в стали на удельные показатели синхронных реактивных машин и систему управления электроприводом</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
Разраб.		Семенова М.С.					4	51
Провер.		Горожанкин А.Н.						
Реценз		Сычев Д.А.						
Н. Контр.		Функ Т.А.						
Утверд.		Григорьев М.А.				<i>ЮУрГУ Кафедра «АЭП»</i>		

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 СИНХРОННЫЕ РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ	8
1.1 Основные особенности и принцип работы	8
1.2 Преимущества и недостатки.....	10
1.3 Область применения.....	11
2 ВИДЫ ПОТЕРЬ В ДВИГАТЕЛЕ	13
2.1 Электрические потери.....	13
2.2 Механические потери.....	14
2.3 Добавочные потери.....	14
2.4 Магнитные потери	15
2.4.1 Потери на гистерезис	16
2.4.2 Потери на вихревые токи.....	17
3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ В СРЕДЕ ANSYS MAXWELL.....	19
3.1 Построение геометрии двигателя.....	19
3.2 Построение статора	20
3.3 Построение паза статора	21
3.4 Построение ротора.....	23
3.5 Обмотка статора.....	24
3.6 Задание материалов	25
3.7 Настройка модели.....	29
3.8 Сетка конечных элементов	32
3.9 Вывод результатов.....	33
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ В СТАЛИ.....	34
4.1 Влияние потерь на систему управления.....	36
4.2 Расчет потерь в стали статора и ротора в функциях скорости и нагрузки	39

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА

ПОТЕРЬ.....	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	49

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		6

ВВЕДЕНИЕ

Использование синхронного реактивного двигателя является одним из путей получения электродвигателя высокого класса энергоэффективности, так как не требует значительного усложнения технологии производства, избыточного увеличения размеров и массы, а также использования дорогих постоянных магнитов [9]. В СРД отсутствуют электрические потери в обмотке ротора, и поэтому он может соответствовать самым высоким классам энергоэффективности [15].

Целью выпускной квалификационной работы является проектирование синхронного реактивного двигателя в среде ANSYS Maxwell и определение влияния потерь в стали на удельные показатели двигателя и его систему управления.

Актуальность темы заключается в возможности широкого спектра применения синхронных двигателей в различных сферах электроэнергетики и электротехники: начиная с силовых установок тягодутьевых механизмов и заканчивая различными механизмами металлургической и металлообрабатывающей промышленности.

Проблематикой работы является недостаточный уровень исследований в области влияния потерь на работу двигателя. Более того, потери электрического двигателя напрямую определяют его энергоэффективность.

Поэтому, главной задачей работы является исследование магнитных потерь в стали на гистерезис и вихревые токи, создаваемые электромагнитным полем синхронного реактивного двигателя.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

1 СИНХРОННЫЕ РЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

В последние годы, благодаря широким возможностям современного компьютерного моделирования, которые позволяют находить наиболее эффективные версии конструкций роторов и статоров, развитию микропроцессорных систем управления, датчиков положения и силовых полупроводниковых устройств, активно развиваются синхронные реактивные двигатели [15, 16].

Синхронным реактивным двигателем называется такой электродвигатель, вращающий момент которого обусловлен неравенством магнитных проводимостей по поперечной и продольным осям ротора, не имеющего обмоток возбуждения или постоянных магнитов [3].

1.1 Основные особенности и принцип работы

Как и в асинхронном двигателе в СРД используется конструкция статора с трехфазной всыпной обмоткой [6].

Основной особенностью синхронного реактивного двигателя является его ротор, который не имеет обмоток, а также постоянных магнитов. Сердечник ротора сделан неоднородно: магнитная проводимость вдоль ротора отличается от магнитной проводимости поперек. На рисунке 1.1 представлены три основных типа роторов: поперечно-расслоенный ротор, ротор с явно выраженными полюсами и аксиально-расслоенный ротор [14].

Статор реактивного двигателя бывает с распределенной и сосредоточенной обмоткой, и состоит из корпуса и сердечника с обмоткой [17].

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

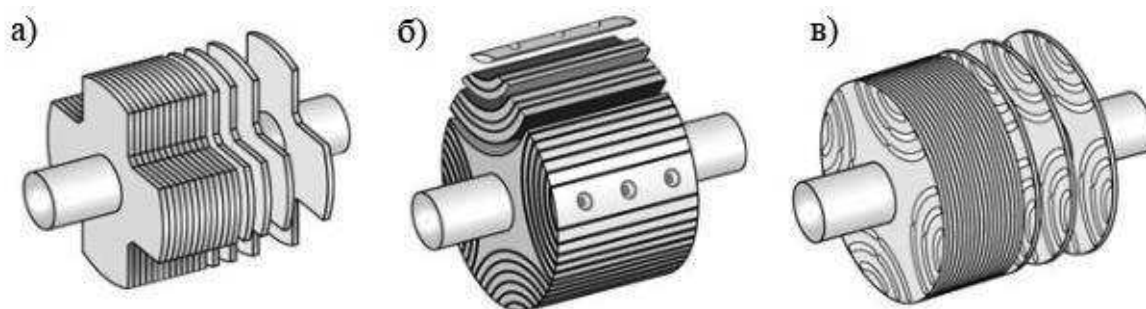


Рисунок 1.1 – Ротор с явно выраженными полюсами (а), аксиально-
расслоенный ротор (б), поперечно-расслоенный ротор (в)

Принцип работы СРД. Вращающееся магнитное поле создается переменным током, проходящим по обмоткам статора. Момент вращения создается при попытке ротора установить свою наиболее магнито-проводящую ось (d-ось) с приложенным к нему полем так, чтобы магнитное сопротивление для формируемого статором магнитного потока оказалось бы минимальным [21].

На рисунке 1.2 показаны направления магнито-проводящих осей d и q.

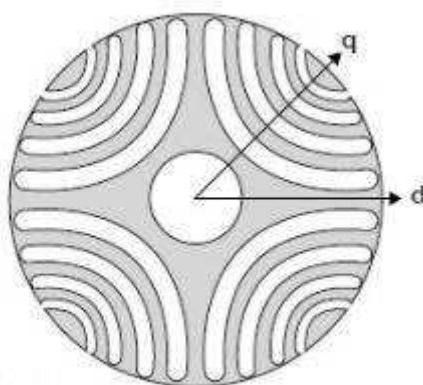


Рисунок 1.2 – Направление магнито-проводящих осей поперечно-расслоенного
ротора СРД

Через d – ось происходит контроль и управление амплитудой потока статора. Управление моментом осуществляется путем контроля фазы тока, то есть угла между вектором тока обмоток статора и d-осью ротора во вращающейся системе координат. Контроль тока статора, отвечающего за намагничивание и создание момента, управляется через q – ось.

В синхронном реактивном двигателе поле может считаться синусоидальным. Однако, всегда будет существовать момент, направленный на уменьшение потенциальной энергии системы путем уменьшения искажения поля по оси q . Если сохранять угол между осью d и линиями магнитного поля постоянным, путем контроля магнитного поля, то электромагнитная энергия будет непрерывно преобразовываться в механическую [15].

1.2 Преимущества и недостатки

Для достижения высоких рабочих свойств СРД проектируется для питания от ПЧ, который, благодаря заложенному алгоритму, устраняет необходимость демпфирующей короткозамкнутой обмотки. Кроме того, применение частотного преобразователя позволяет увеличить скоростной диапазон вращения двигателя [11].

Основными преимуществами СРД являются:

- простота конструкции за счет отсутствия короткозамкнутой обмотки и постоянных магнитов;
- низкий нагрев, в связи с отсутствием потерь в роторе, обусловленных отсутствием обмотки. Данное преимущество повышает срок службы двигателя и уменьшает массогабаритные показатели;
- высокие перегрузочные моменты, так как снижаются потери на нагрев, номинальный ток двигателя может быть завышен;
- небольшой момент инерции, связанный со сравнительной легкостью ротора. Двигатель быстрее разгоняется до номинальной скорости, что влечет за собой экономию электроэнергии;
- жесткая механическая характеристика в разомкнутой системе, которая позволяет поддерживать скорость на заданном уровне с большой точностью;

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10

— возможность регулирования скорости в большом диапазоне, за счет использования преобразователя частоты.

В качестве основного недостатка СРД можно назвать, некоторое снижение коэффициента мощности, в сравнение с АД, вследствие относительно высокого значения намагничивающего тока реактивного двигателя. Это ведет к тому, что ПЧ для питания СРД должен иметь несколько больший номинал по току при той же мощности. Однако, на данный момент существуют преобразователи частоты, которые способны устранить недостаток, связанный с потреблением большого реактивного тока. Встроенной функцией преобразователя частоты является отслеживание потребляемого тока двигателя в каждый момент времени. Это объясняется тем, что при повороте вала изменяется магнитное сопротивление в зазоре и формируется магнитное поле в соответствии с этим изменением, добиваясь высокой производительности [6].

1.3 Область применения

Синхронный реактивный двигатель имеет лучший КПД в сравнении с асинхронным двигателем, как в номинальном режиме работы, так и при работе на всем диапазоне скоростей при регулировании вниз от номинала. Обладает высоким перегрузочным моментом до 5 крат и выше от номинального значения и имеет отличные характеристиками при вращении мощных приводов. Благодаря этому СРД могут найти широкое применение в промышленности.

Синхронные машины отличаются от асинхронных гораздо большей мощностью и полезной нагрузкой. При отличии от асинхронных двигателей в синхронных сохраняется постоянство частоты вращения при ударных нагрузках, что позволяет их использовать в различных механизмах в металлургической и металлообрабатывающей промышленности.

Довольно часто двигатели с синхронным принципом действия используются в качестве силовых машин в компрессорных установках большой

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

производительности. Они способны поддерживать постоянной скоростью вращения, что важно для вращения приводов в виде насосов, компрессоров, вентиляторов, и различных генераторов переменного тока.

Сами двигатели с синхронным принципом действия устойчивы к колебаниям напряжения в сети, и обеспечивают постоянство скорости вращения при их возникновении. Синхронные электродвигатели при понижении питающего напряжения сохраняют большую перегрузочную способность, по сравнению с асинхронными.

Благодаря своим отличительным достоинствам, комплексное исследование синхронных реактивных электрических машин позволит быстрее внедрить их в различные сферы промышленности и производства. Наличие отличительных перегрузочных способностей и отсутствие ударных нагрузок на ротор двигателя позволяет использовать СРД в ответственных установках с большой мощностью, например, в составе верхнего привода буровых установок (мощность 300 кВт) [14].

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

2 ВИДЫ ПОТЕРЬ В ДВИГАТЕЛЕ

Преобразование энергии сопровождается рассеянием части подведенной энергии, т. е. потерями.

В электрических машинах различают следующие виды потерь:

- Электрические;
- Магнитные;
- Механические и вентиляционные;
- Добавочные.

Электрические, магнитные и механические потери являются основными потерями, возникающие в результате процессов, которые определяют работу машины [1].

2.1 Электрические потери

К электрическим потерям относят такие потери, возникающие в проводниках обмоток, соединительных шинах и проводах, в переходных контактах щетки — коллектор или щетки — контактные кольца.

Для синхронного реактивного двигателя характерны только потери в проводниках обмоток статора, которые так же называют потерями в меди.

Потери, возникающие во всех токоведущих частях электрической машины можно рассчитать по формуле:

$$P_{\Sigma} = \sum I_i^2 \cdot r_{vi}, \quad (1)$$

где I_i – ток, протекающий по обмотке;

r_{vi} – сопротивление данной обмотки или i -го участка токопровода.

Электрические потери рассчитывают отдельно для каждой из обмоток фазы машины переменного тока.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		13

2.2 Механические потери

Механические потери в электрических машинах состоят из потерь на трение вращающихся частей машины. К вентиляционным потерям относятся затраты мощности на циркуляцию охлаждающего воздуха или газа.

В машинах с самовентиляцией на вентиляционные потери расходуется часть подводимой к машине мощности. В машинах с принудительной вентиляцией или с жидкостным охлаждением для циркуляции охлаждающего воздуха устанавливают вентиляторы или компрессоры с независимым приводом. Потребляемая их двигателями мощность учитывается при расчете КПД основной машины как потери на вентиляцию.

Возникающие потери при трении зависят от материала трущихся деталей, механического давления на поверхность трения, состояния этой поверхности и скорости вращения вала машины.

Формулу расчета механических потерь можно записать следующим образом:

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{подш}} + P_{\text{вент}} + P_{\text{тр.щ}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{подш}}$ – потери в подшипниках;

$P_{\text{вент}}$ – вентиляционные потери;

$P_{\text{тр.щ}}$ – потери на трение щеток.

В синхронном реактивном двигателе, потери, возникающие при трении щеток, отсутствуют.

2.3 Добавочные потери

Добавочные потери образуются в поверхностном слое ротора, они вызваны пульсациями поля вследствие зубчатой поверхности статора и ротора, а также это потери, вызванные полями рассеивания.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

Формула расчета добавочных потерь выглядит следующим образом:

$$P_d = P_{\text{п}} + P_r, \quad (3)$$

где $P_{\text{п}}$ – пульсационные потери;

P_r – потери на рассеивания.

Добавочные потери зависят от значения основного потока машины и вызваны зубчатым строением сердечников. Эти потери иногда называют также добавочными потерями холостого хода, так как они существуют в возбужденной машине уже при холостом ходе.

2.4 Магнитные потери

Магнитные потери, или потери в стали, возникают в участках магнитопровода с переменным магнитным потоком – в статоре синхронной машины. Они включают в себя потери на гистерезис и вихревые токи, вызванные перемагничиванием сердечников стали, а также добавочные потери.

В общем случае магнитные потери рассчитываются по различным разновидностям формулы Штейнмеца, которая в классическом виде выглядит следующим образом:

$$P = c \cdot f^\alpha \cdot B^\beta; \quad (4)$$

где c – коэффициент удельных потерь;

f – частота внешнего магнитного поля, Гц;

B – величина магнитной индукции поля, Тл;

α – коэффициент, зависящий от свойств ферромагнитного материала;

β – показатель степени, учитывающий зависимость потерь в стали от частоты перемагничивания.

2.4.1 Потери на гистерезис

Статор и ротор двигателя изготавливают из электротехнической стали, которая является ферромагнитным материалом. Такой материал способен намагничиваться под действием внешнего магнитного поля и частично сохранять приобретенную намагниченность после удаления внешнего поля. Величина остаточного магнетизма зависит от свойств материала и оказывает влияние при необходимости перемагничивания сердечника, т. е. размагничивание до нуля и намагничивание в противоположном направлении.

Иными словами, гистерезис – это отставание магнитной индукции от напряженности магнитного поля. При каждом новом намагничивании сердечника для уничтожения его остаточного магнетизма приходится действовать на сердечник магнитным потоком противоположного направления. Все это приводит к потерям на перемагничивание в магнитопроводе.

Каждому магнитному материалу соответствует своя величина потерь на гистерезис, пропорциональная частоте перемагничивающего магнитного поля, а также площади гистерезисной петли данного материала.

На рисунке 2.1 представлена петля гистерезиса, которая показывает ход зависимости намагничивания от напряженности внешнего поля. Чем больше площадь петли, тем большую работу на перемагничивание надо затратить.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

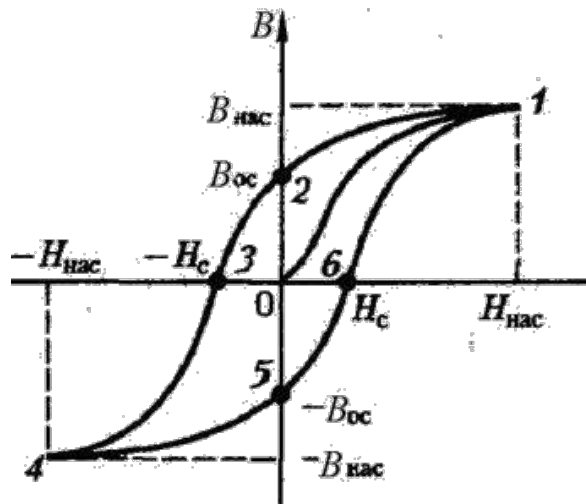


Рисунок 2.1 – Кривая намагничивания

Для уменьшения потерь на гистерезис применяют такие магнитные материалы, коэрцитивная сила которых мала, то есть материалов с тонкой петлей гистерезиса, например, в качестве материала сердечника можно применить специальную магнитомягкую сталь, имеющую определённый состав и структуру.

2.4.2 Потери на вихревые токи

При воздействии переменного магнитного поля в теле проводника, находящегося в этом поле, индуцируется ЭДС, под действием которой возникают вихревые токи (токи Фуко). Потери, вызываемые вихревыми токами, зависят от электрического сопротивления перематниваемого материала и от конфигурации магнитопровода.

Вихревые токи порождают свои собственные магнитные потоки, которые, по правилу Ленца, противодействуют магнитному потоку и замыкаются по путям, лежащим в плоскостях, перпендикулярных направлению поля (см. рисунок 2.2).

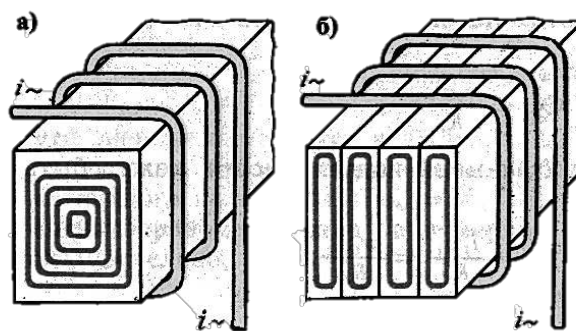


Рисунок 2.2 – Вихревые токи: а - в массивном сердечнике, б - в пластинчатом сердечнике

Для уменьшения потерь на вихревые токи увеличивают электрическое сопротивление магнитопровода, для этого сердечники набирают из отдельных тонких (0,1-0,5 мм) пластин, изолированных друг от друга с помощью специального лака или окалины. Такое деление на пластины, расположенные перпендикулярно направлению вихревых токов, ограничивает возможные контуры путей вихревого тока, что сильно уменьшает величину этих токов [12].

3 ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ В СРЕДЕ ANSYS MAXWELL

ANSYS Electronics Desktop – это универсальная программа, которая позволяет проектировать и моделировать различные электрические, электронные и электромагнитные компоненты, устройства и системы.

Интерфейс ANSYS позволяет создавать виртуальные электромагнитные и тепловые модели устройств, разрабатывать модели системного управления, устанавливать связи между проектами.

В рамках рабочего места доступны все передовые расчётные модули, такие как ANSYS HFSS, ANSYS Maxwell, ANSYS Q3D Extractor и ANSYS IcePak с использованием электрических (ECAD) и механических CAD (MCAD) геометрических моделей.

Для решения поставленной задачи воспользуемся расчетным модулем ANSYS Maxwell, который используется для моделирования двумерных и трехмерных электромагнитных полей, и анализа электрических машин. Основой расчета статических, гармонических электромагнитных и электрических полей, а также переходных процессов в полевых задачах является метод конечных элементов [8].

3.1 Построение геометрии двигателя

При построении модели электрической машины может быть использовано три способа:

1. Использование модуля RMxprt. Это специальное решения для расчета электрических машин, в котором доступно 19 типов машин для анализа, у которых известно аналитическое решение;

2. Построение модели с помощью инструментов самого Maxwell при использовании векторного решения магнитного поля;

3. Создание геометрии машины в CAD-системе, например, в SolidWorks и ее импорт в Maxwell.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

В программном пакете ANSYS Maxwell был спроектирован синхронный реактивный двигатель при помощи самого Maxwell, так как в RMXprt нет необходимых инструментов для его создания, также, при проектировании, был использован SolidWorks.

Номинальные данные исследуемой машины представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Номинальные данные и параметры СРМ

Номер	Параметр	Размерность	Значение
1	Номинальная мощность, P_H	кВт	16
2	Номинальная скорость, ω_H	об/мин	1500
3	Номинальный момент, M_H	Н·м	98
4	Число фаз, mf	–	6
5	Число пар полюсов, p	–	2
6	Число параллельных ветвей, a	–	2
7	Номинальное фазное напряжение, U_H	В	150
8	Номинальный ток, I_H	А	50
9	Номинальная частота, f_H	Гц	50
10	Индуктив. по продольной оси, L_d	Гн	0,0132
11	Индуктив. по поперечной оси, L_q	Гн	0,0022
12	Момент инерции ротора, J	кг·м ²	0,061
13	Коэф. насыщ. маг. системы, k_{nas}	–	0,06
14	Сопротивление вихревым токам, R_m	Ом	15

3.2 Построение статора

В Maxwell 2D существуют команды построения фигур, которые располагаются на панели рисования *Modeler Draw Sheet*. Воспользуемся одной из геометрических фигур для построения статора и внешней воздушной границы, при помощи функции *Draw Circle*.

Параметры, задаваемые при построении:

- Внешний диаметр $D = 254\text{мм}$;
- Внутренний диаметр $D = 158\text{мм}$;
- Диаметр воздушной границы $D = 300\text{ мм}$;

Результат построения показан на рисунке 3.1.

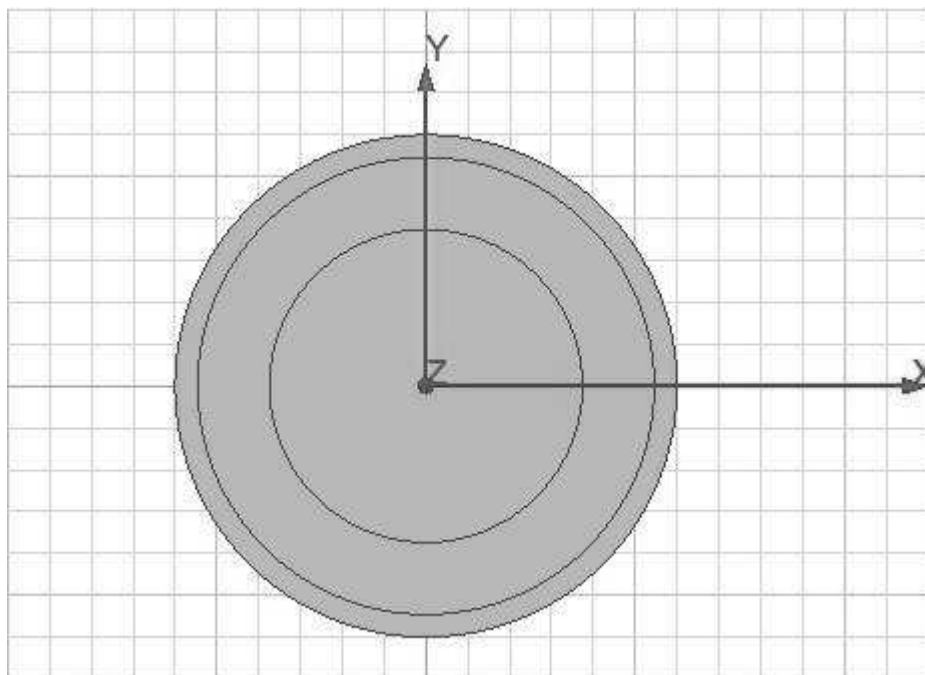


Рисунок 3.1 – Построение статора машины

3.3 Построение паза статора

Паз статора имеет трапециевидальную форму. Для его построения используется функция *Draw Line*. После создания скопируем паз, воспользовавшись командой *Duplicate Around Axis*. В появившемся меню указываем число пазов и угол между ними.

Далее, с помощью функции *Subtract* вычитаем из окружности статора построенные пазы. Полученный результат показан на рисунке 3.2.

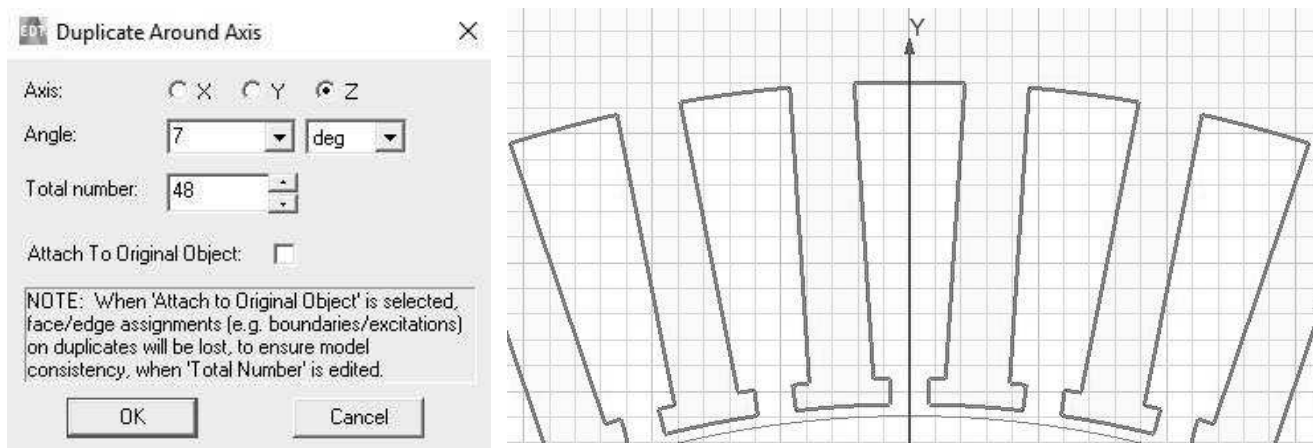


Рисунок 3.2 – Настройка паза статора

После построения пазов статора необходимо расположить в них обмотку, которая будет представлять собой прямоугольник. Площадь меди в пазу можно рассчитать по следующей по формуле:

$$S_M = S_{\Pi} \cdot n \cdot d, \quad (5)$$

где S_{Π} – число эффективных проводников в пазу;

n – число параллельных ветвей обмотки фазы;

d – номинальный диаметр неизолированного провода.

Полученную фигуру скопируем и разместим в пазах статора. Результат представлен на рисунке 3.3.

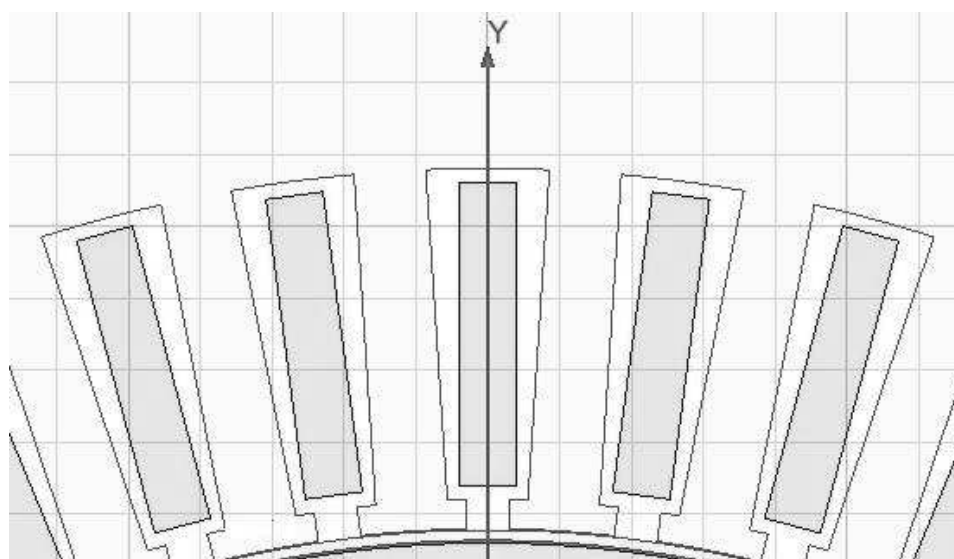


Рисунок 3.3 – Обмотка в пазах статора

3.4 Построение ротора

Исследуемый двигатель – синхронный реактивный двигатель с поперечно-расслоенным ротором.

Для создания геометрии ротора был использован программный комплекс *SolidWorks*, который представляет собой инструмент для 3D моделирования и автоматизированного проектирования сложных изделий различного назначения. Это полноценный набор для конструирования изделий в цифровом виде, который содержит в себе множество дополнительных инструментов, позволяющих производить над моделью виртуальные технические испытания.

Параметры ротора:

- Внешний диаметр $D = 157$ мм;
- Диаметр вала $D = 64$ мм.

После построения импортируем полученную модель ротора в ANSYS Maxwell через команду *Modeler – Import*. Результат изображен на рисунке 3.4.

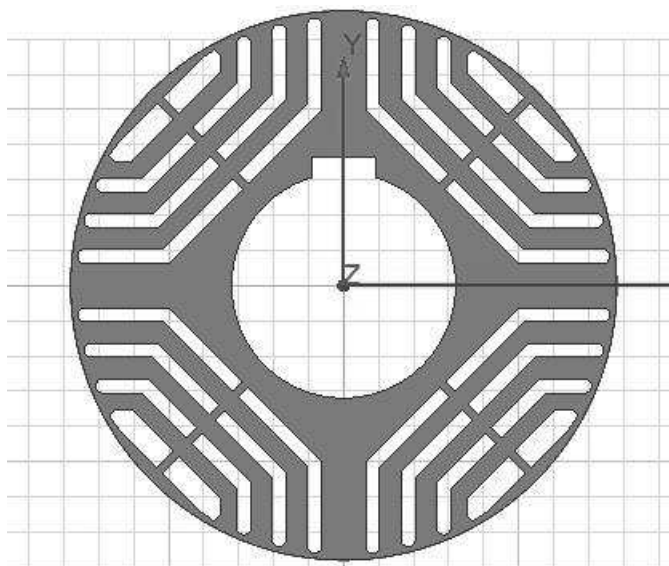


Рисунок 3.4 – Ротор с поперечно- расслоенным ротором

Соединяем все элементы и получаем готовую модель синхронного двигателя с поперечно-расслоенным ротором, которая представлена на рисунке 3.5.

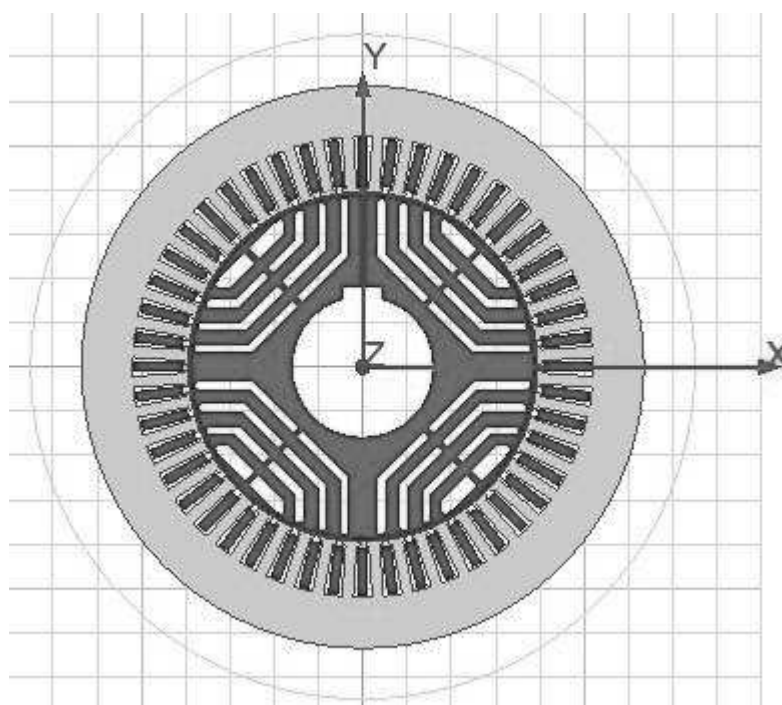


Рисунок 3.5 – Конечная модель двигателя

В Maxwell рассчитать полученную геометрию можно при двух различных постановках решения:

- *Eddy Current* (гармоническая);
- *Transient* (переходный процесс).

В случае использования *Eddy Current* результатом решения является распределение поля в определённый момент времени (мгновенное значение распределения поля).

В случае *Transient* рассчитывается полный электромеханический переходный процесс на рассматриваемом промежутке времени [24].

3.5 Обмотка статора

В дереве проекта выбираем *Excitations – Add Winding* выбираем способ питания обмоток – *Current*. И в поле ввода задаем значения для каждой фазы:

$$\text{Фаза A: } 50 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time});$$

$$\text{Фаза В: } 50 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} + \pi/3);$$

$$\text{Фаза С: } 50 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \text{time} - \pi/3).$$

Выделим сечения катушек, в которых ток имеет положительное направление, и, с помощью команды *Assign Excitations – Add Coil*, выберем создание новой катушки. В появившемся окне зададим число проводников в катушке и направление тока. Для отрицательного направления операцию необходимо повторить.

Далее, с помощью менеджера *Add Coil*, присваиваем сечения катушек обмоткам фаз. Результат для фазы А представлен на рисунке 3.6.

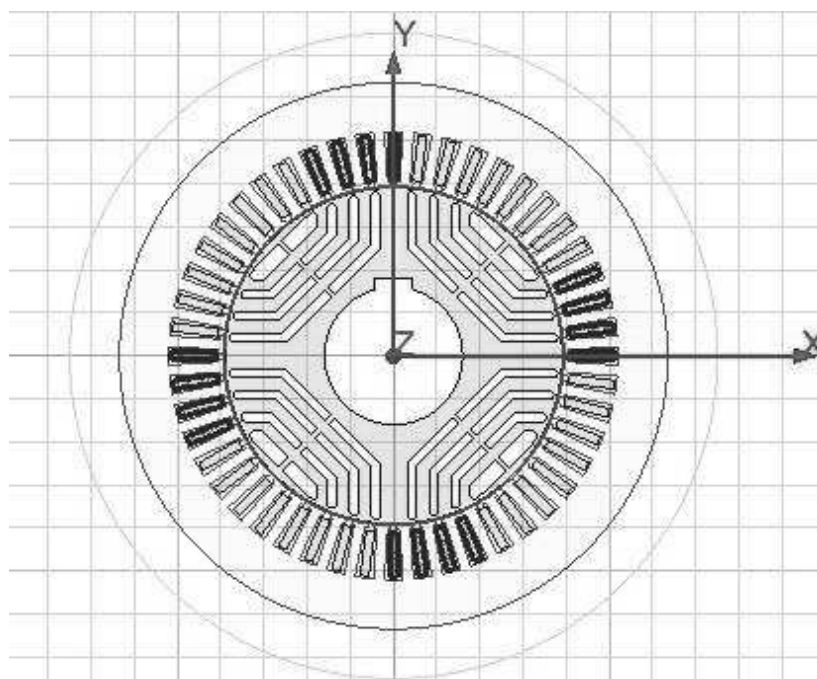


Рисунок 3.6 – Обмотка фазы А

3.6 Задание материалов

После построения геометрии машины для расчета необходимо задать свойства материалов всех твердотельных объектов в составе системы. При проведении теоретических исследований установлено, что неправильный подбор материалов искажает картину электромагнитного поля, что влияет на результаты расчета.

Выделяем объекты и, через опцию *Assign Material*, выбираем необходимый материал.

В исследуемом двигателе использовался следующий материал:

- Электротехническая сталь 2013 (сердечник статора);
- Электротехническая сталь 2412 (сердечник ротора);
- Воздух;
- Медь (обмотки статора).

В библиотеке материалов Maxwell нет всех материалов, поэтому есть возможность создания своего, задав необходимые свойства материала.

Для сердечника статора используется электротехническая сталь 2013. Это тонколистовая холоднокатаная изотропная сталь, предназначенная для магнитных цепей электрических машин, аппаратов и приборов [19].

Основные характеристики стали 2013:

- Удельное сопротивление $R = 140 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- Удельная проводимость материала, которую можно задать через строку *Bulk Conductivity*, для стали 2013 это $\sigma = 7143857 \text{ См/м}$;
- Плотность $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$;
- Толщина листа $d = 0,5 \text{ мм}$.

В строке *Core Loss Model* выбираем *Electrical Steel*. *Electrical Steel* – это способ учета потерь, как некой поправки в расчетах. Без моделирования петли. Без расчета вихревых токов, как полевой задачи.

Так же может быть выбрана функция *Hysteresis Model*, это модель гистерезиса в нестационарных решателях ANSYS Maxwell 2D и 3D для очень точного определения потерь в стали и моделирования гистерезисного поведения

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

ферромагнетиков с учётом частных петель. Однако, данный метод не был использован за неимением достаточных данных свойства материала.

Зададим кривую намагничивания для стали 2013 (см. рисунок 3.7).

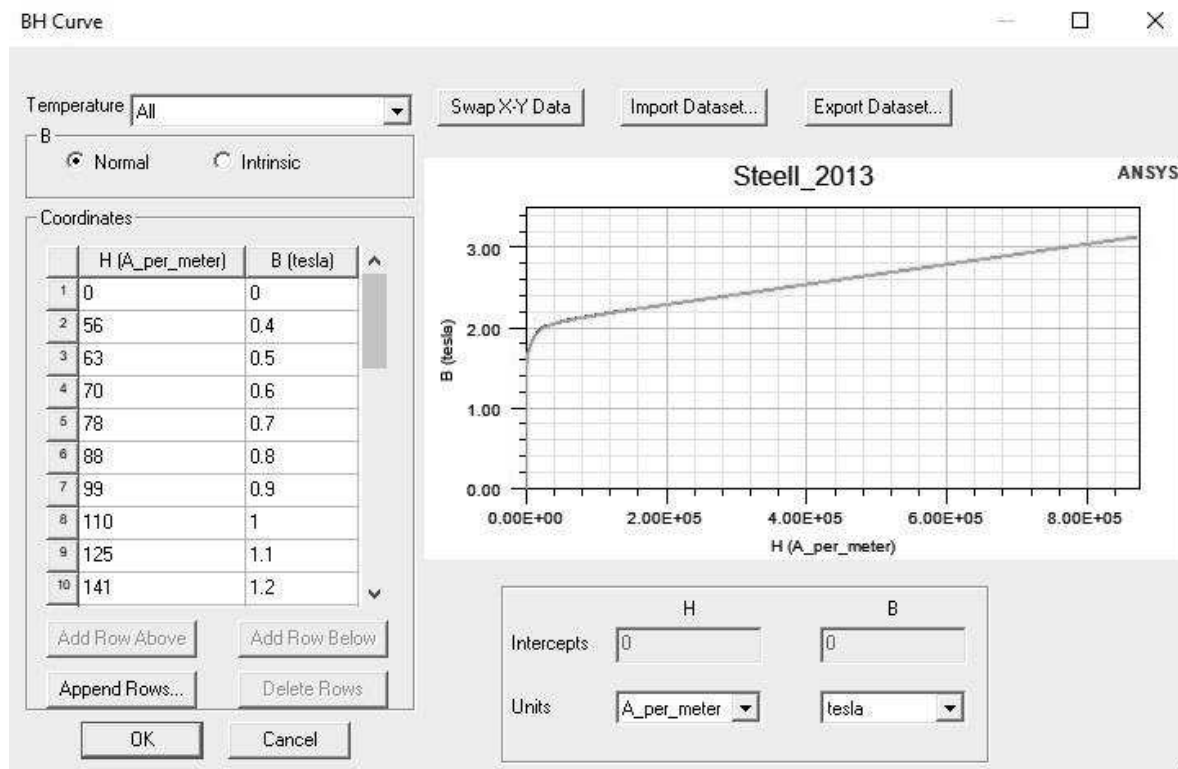


Рисунок 3.7 – Кривая намагничивания $B = f(H)$ для стали 2013

Для получения коэффициентов, с помощью которых будет производиться расчет удельных потерь в стали, воспользуемся калькулятором *Core Loss at One Frequency*. В появившемся окне необходимо задать зависимость удельных потерь в стали от индукции. В справочнике указано значение для индукции $B = 1$ Тл и $f = 50$ Гц. Необходимые значения можно рассчитать по формуле:

$$P_{уд}(B) = P_{1,0/50} \cdot B^2 \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3}; \quad (6)$$

Результаты расчета сведены в таблицу 3.2. График зависимости удельных потерь от индукции изображен на рисунке 3.8.

Таблица 3.2 – Расчетные значения удельных потерь

B , Тл	0	0,2	0,5	0,8	1	1,2	1,5	1,8	2
$P_{уд}$, Вт/м ³	0	0,1	0,625	1,6	2,5	3,6	5,6	8,1	10

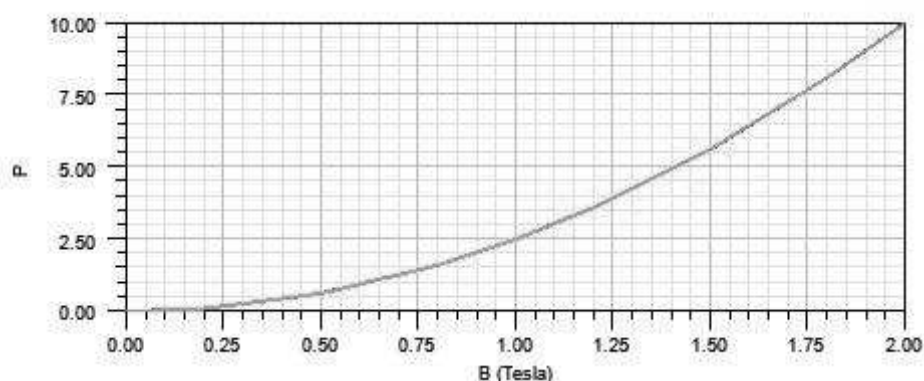


Рисунок 3.8 – Зависимость удельных потерь в стали от индукции $P_{уд} = f(H)$

После заполнения всех данных получим рассчитанные коэффициенты:

$$K_h = 245,37,$$

$$K_c = 2,93.$$

Для ротора была использована электротехническая сталь 2412. Тонколистная сталь, массовая доля кремния в котором не нормируется 2,8-3,8 % [20].

Основные характеристики для стали 2412:

- Удельное сопротивление $R = 500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$;
- Удельная проводимость материала $\sigma = 2000000 \text{ См/м}$;
- Плотность $\rho = 7650 \text{ кг/м}^3$;
- Толщина листа $d = 0,35 \text{ мм}$.

По такому же принципу, как для стали 2013 построим кривую намагничивания $B = f(H)$. Результат на рисунке 3.9.

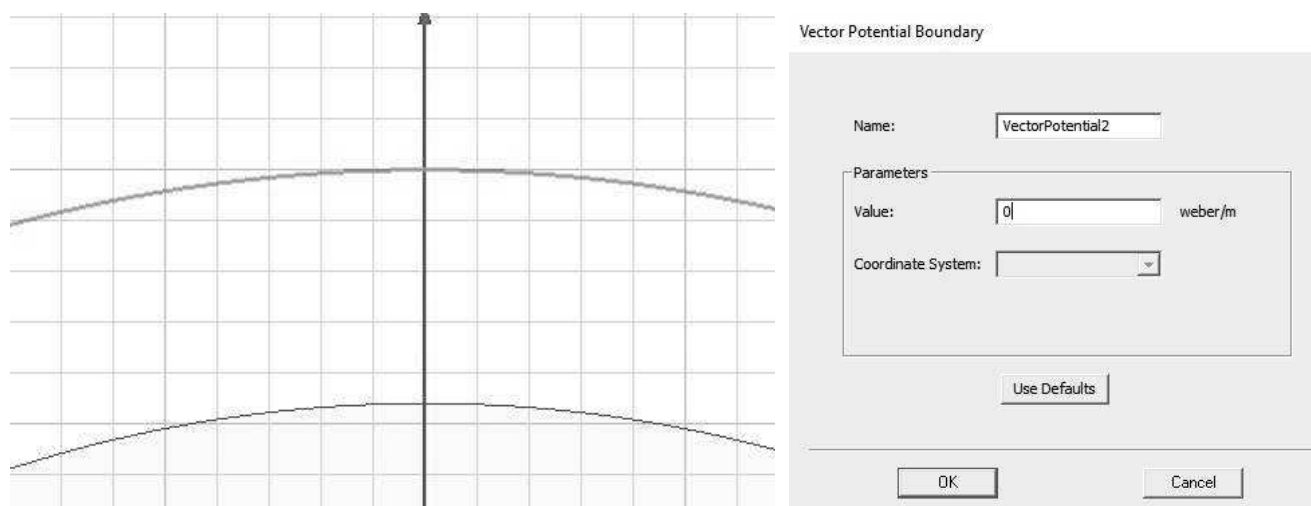


Рисунок 3.10 – Задание граничных условий

Далее необходимо задать область вращения ротора. *Band* – окружность, которая делит воздушный зазор на две части, имеет назначенный материал и содержит все области которые вращаются.

Выделяем область *Band* и, с помощью команды *Assign Band*, присваиваем параметры (см. рисунок 3.11).

На вкладке *Type* указываем, что предполагается вращение вокруг оси *Z* (флажок *Rotation* и *Moving Vector = Z*).

Во Вкладке *Data – Initial Position* задается начальный угол поворота ротора.

Через команду *Mechanical – Initial Angular Velocity* задаем скорость вращения ротора.

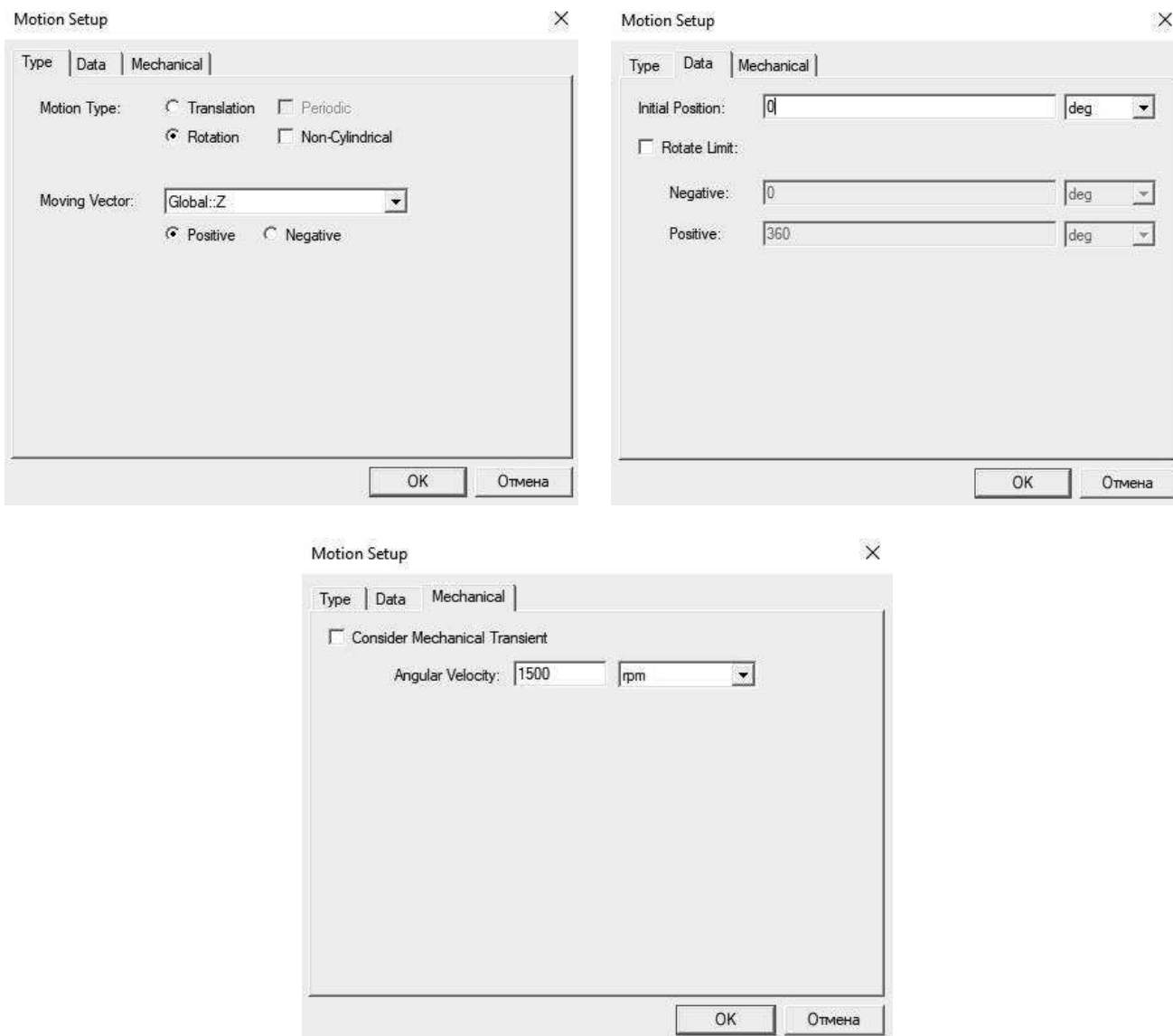


Рисунок 3.11 – Настройка области вращения

После создания граничных условий и области вращения ротора, создадим новый профиль решения, нажав в дереве проекты на *Add Solution Setup*. В появившемся окне указываем время *Stop time* и шаг расчета *Time step* (см. рисунок 3.12).

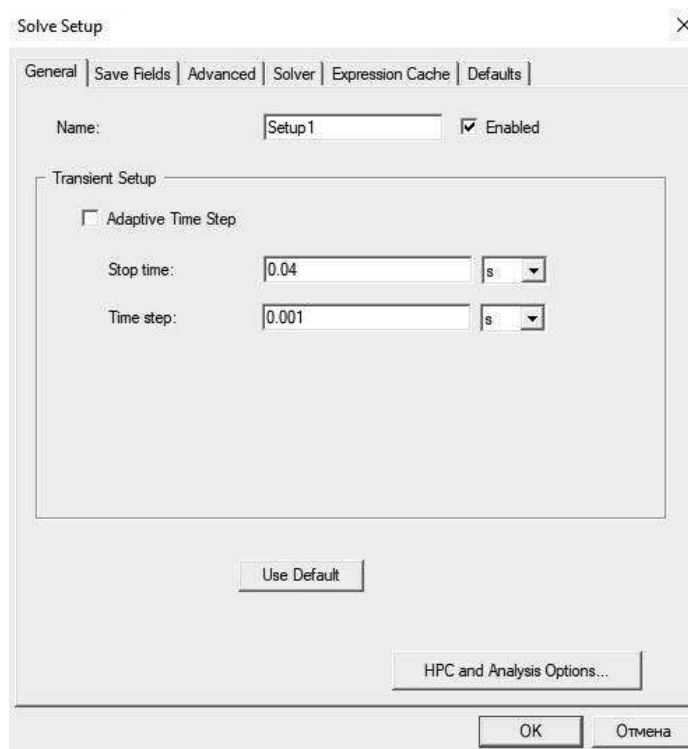


Рисунок 3.12 – Задание времени расчета

3.8 Сетка конечных элементов

Чтобы получить гарантированно единственное решение, ANSYS Maxwell решает задачи электромагнитного поля с помощью уравнения Максвелла в конечной области пространства с соответствующими граничными условиями и начальными условиями. Это значит, что решение задачи сводится к решению системы уравнений для определения неизвестных коэффициентов. Для этого геометрия задачи автоматически разбивается на четырехгранные и треугольные элементы для двухмерной задачи. Все эти объекты модели автоматически объединяются в одну цельную структуру сеточным генератором (*Mesher*). Набор всех тетраэдров или треугольников называется сеткой конечных элементов модели или просто сеткой (см. рисунок 3.13) [8].

Сетку конечных элементов можно получить при запуске программы на расчет, изменив начальное положение ротора ($T \neq 0$).

Запуск расчета осуществляется нажатием правой кнопки мыши по модели, в дереве проекта, и выбираем команду *Analyze All*.

В результате решения воссоздается общая картина поля с помощью методов аппроксимации.

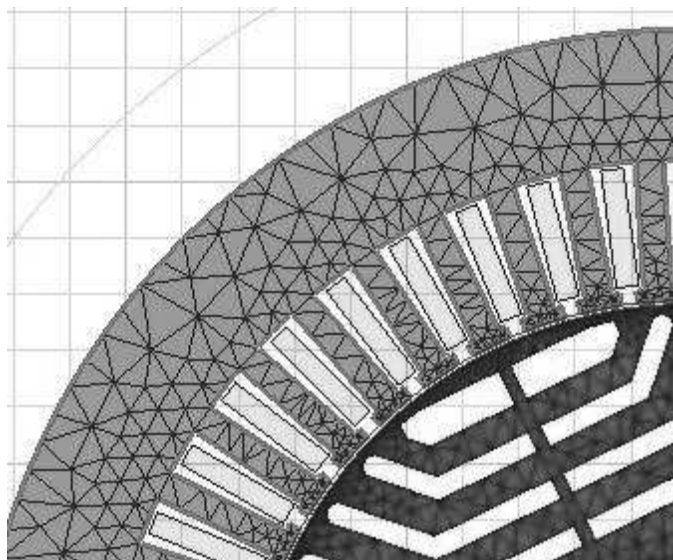


Рисунок 3.13 – Классическая сетка конечных элементов

3.9 Вывод результатов

Для получения необходимых графиков и расчетных значений, через функцию *Results – Create Transient Report – Rectangular Plot* создадим все интересующие зависимости:

- Зависимость исследуемых потерь от времени;
- Угловая характеристика;
- Изменение тока и напряжения во времени.

Чтобы проанализировать полученные графики воспользуемся командой *Results – Create Transient Report – Data Table*, которая создает таблицу необходимых данных, полученных при расчете системы.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОТЕРЬ В СТАЛИ

В среде ANSYS Maxwell существует два способа определения потерь в стали:

1. Аналитический способ, через уравнение Штейметца.
2. Полевой метод, основанный на технологии моделирования вихревых токов.

При определении потерь в стали синхронного реактивного двигателя были использованы оба метода.

В ANSYS Maxwell представлено несколько видов потерь:

1. *Core Loss* – потери в железе определяемые аналитическим методом;
2. *Solid Loss* – потери в железе определяемые полевым методом;

Расчет потерь *Core Loss* относится к аналитическому методу определения потерь и зависит от коэффициентов уравнения Штейметца (5), рассчитываемых программой. Потери *Core Loss* состоят из потерь на гистерезис, вихревые токи и дополнительные потери [26].

$$P_{CoreLoss} = K_c (fB_m)^2 + p_k = K_h f B_m^2 + p_e = K_e (fB_m)^{1,5}, \quad (7)$$

где K_c – коэффициент потерь на вихревые токи;

K_h – коэффициент потерь на гистерезис;

K_e – коэффициент на дополнительные потери.

Для расчета данных потерь и определения необходимых коэффициентов уравнения Штейметца, в окне *Assign Material* задаются свойства материала. Коэффициенты K_c , K_h , K_e рассчитываются на основании кривой намагничивания $B = f(H)$, которая строится во вкладке *Relative Permeability – B-H Curve*.

Так же были рассчитаны потери *Solid Loss*, относящиеся к полемому методу, при котором необходимо определять коэрцитивную силу и основную кривую

намагничивания. Данная модель хорошо подходит при несинусоидальном возбуждении, так как учитывает частные петли гистерезиса [8]. Потери *Solid Loss* зависят от проводимости материала, задаваемой в *Assign Material – Bulk Conductivity*.

После запуска расчета модели *Analyze All*, с помощью функций *Fields – A – Flux Line* получим картину распределения силовых магнитных линий в момент времени $T=5$ мс (см. рисунок 4.1).

Картину распределения индукции построим при помощи функции *Fields – B – Mag_B* (см.рисунок 4.2).

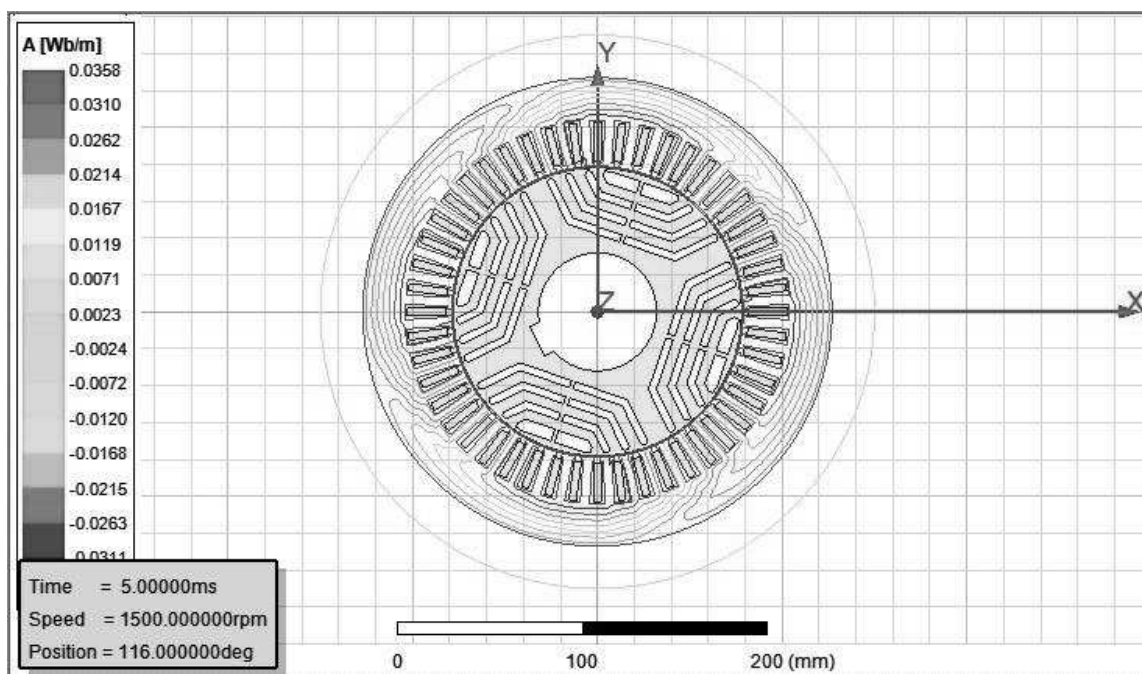


Рисунок 4.1 – Распределение силовых линий

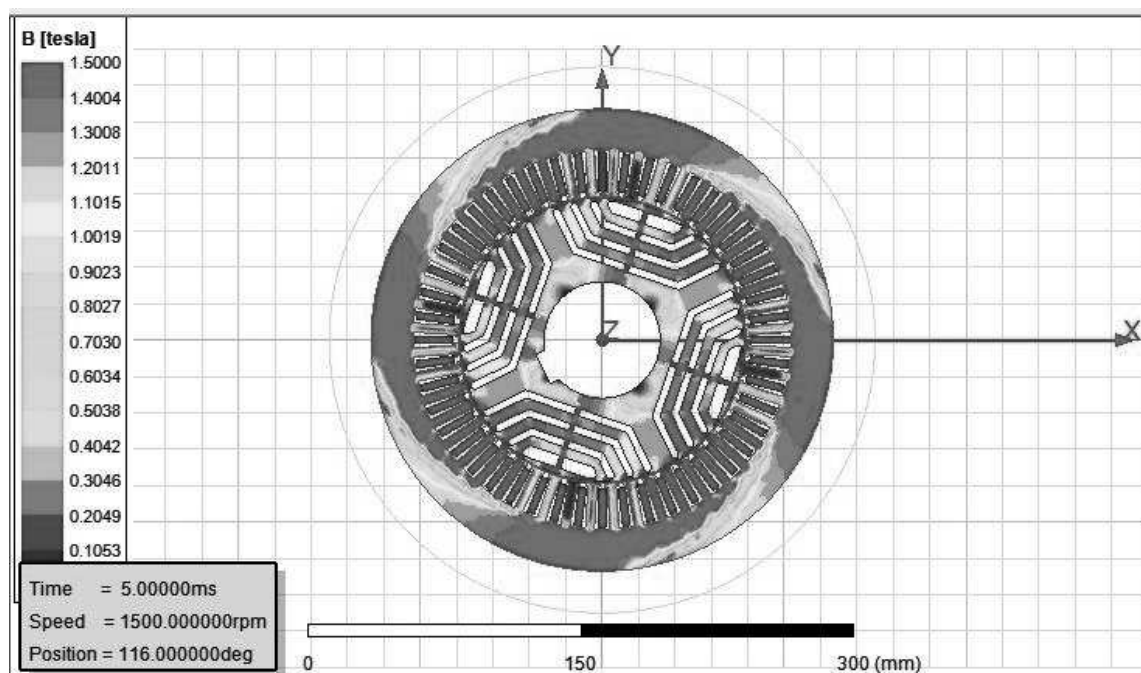


Рисунок 4.2 – Распределение индукции в двигателе

4.1 Влияние потерь на систему управления

Особенностью работы реактивного синхронного двигателя является влияние потерь в стали на систему управления. Без такого учета у электропривода ухудшаются удельные показатели по моменту и уменьшается коэффициент мощности. Для контроля положения ротора используется датчик, сигнал с которого поступает на преобразователь частоты [23].

В модели ANSYS Maxwell требуется определить начальный угол поворота ротора можно методом подбора и снятием угловой характеристики.

Исследование проводилось следующим образом. На обмотки статора подаем ток в момент времени $t = 0$ при произвольном начальном положении ротора $\alpha = 0^\circ$, который задается в *Motional Setup1 – Date – Initial Position*. Раскручиваем ротор до номинальной скорости, которая задается в окне *Motional Setup1 – Mechanical – Angular Velocity*. Получаем зависимость момента двигателя от угла поворота ротора, которая представлена на рисунке 4.3.

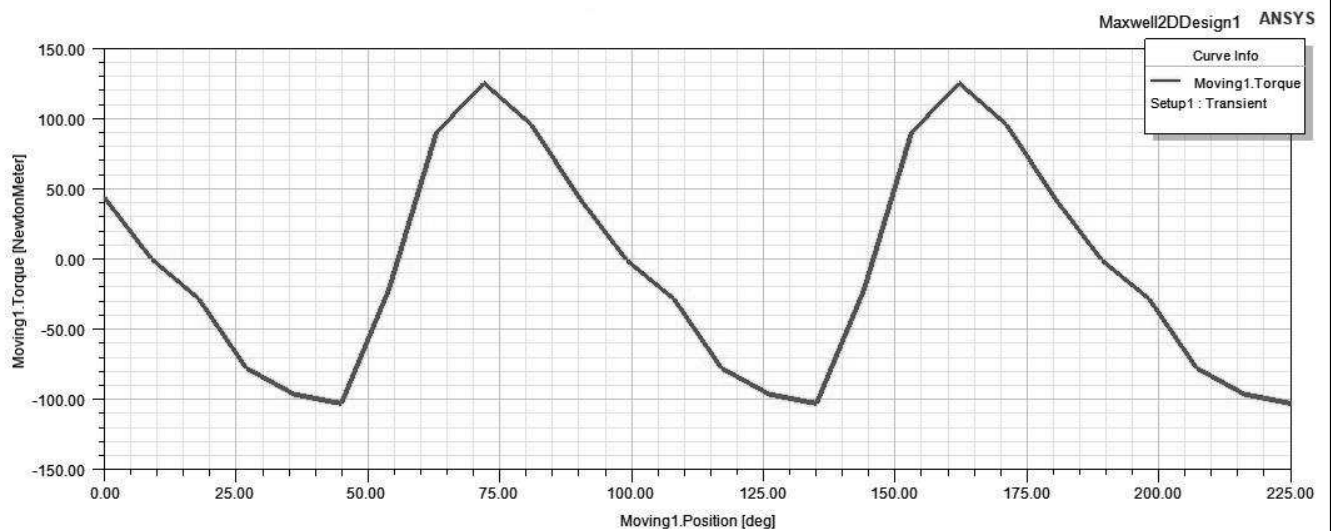


Рисунок 4.3 – Угловая характеристика синхронного реактивного двигателя

Исходя из снятой характеристики (см. рисунок 4.3) определим диапазон угла поворота ротора, соответствующий максимальному моменту, $60^\circ - 80^\circ$. Методом подбора и фиксации значений момента был получен угол $\alpha = 71^\circ$.

Далее подадим номинальный синусоидальный ток на обмотки статора при $t \neq 0$, $\alpha = 71^\circ$. Среднее значение момента двигателя $114 \text{ Н} \cdot \text{м}$ (см. рисунок 4.4). На рисунках 4.5, 4.6 изображены изменения напряжения и тока от времени. Так как на обмотки статора подавался синусоидальный ток, а не напряжение, то на графиках изменения момента и тока переходного режима не наблюдается.

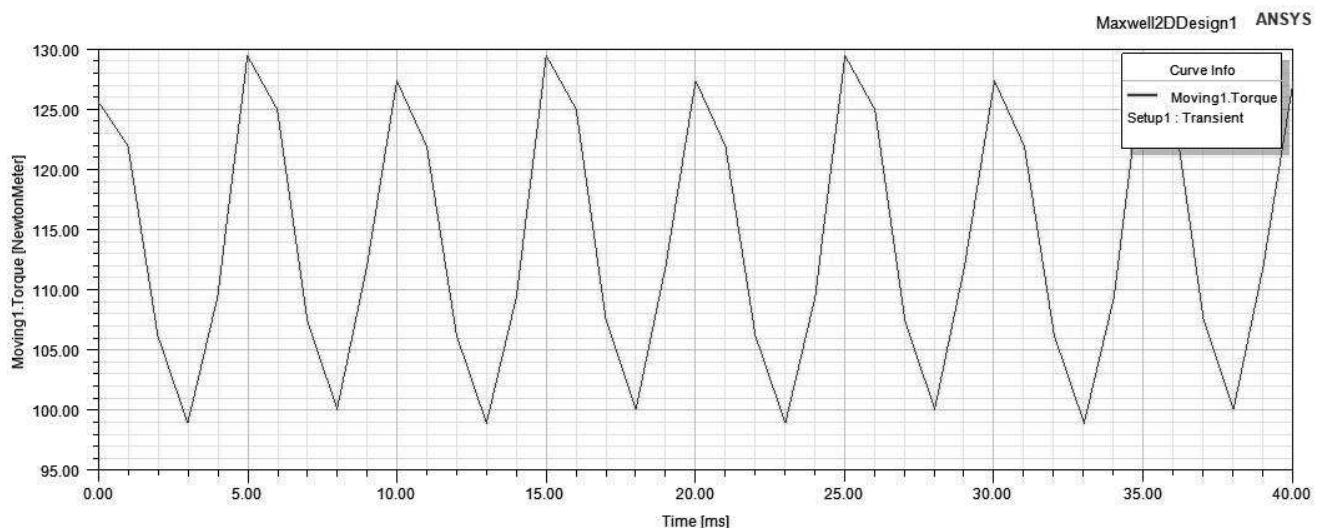


Рисунок 4.4 – Зависимость момента синхронного двигателя от времени

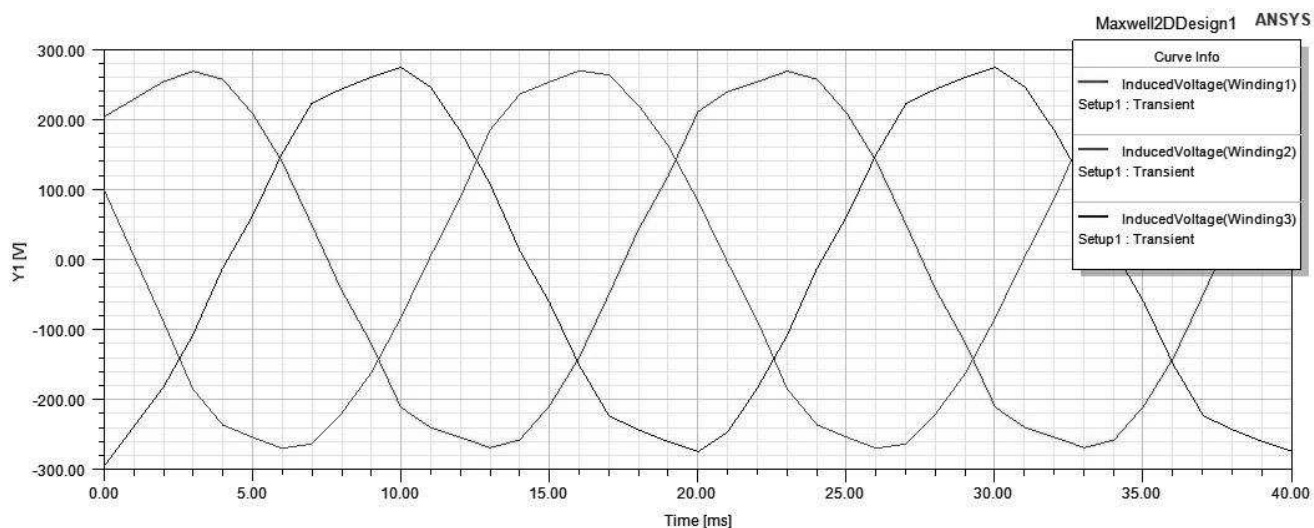


Рисунок 4.5 – Зависимость напряжения от времени

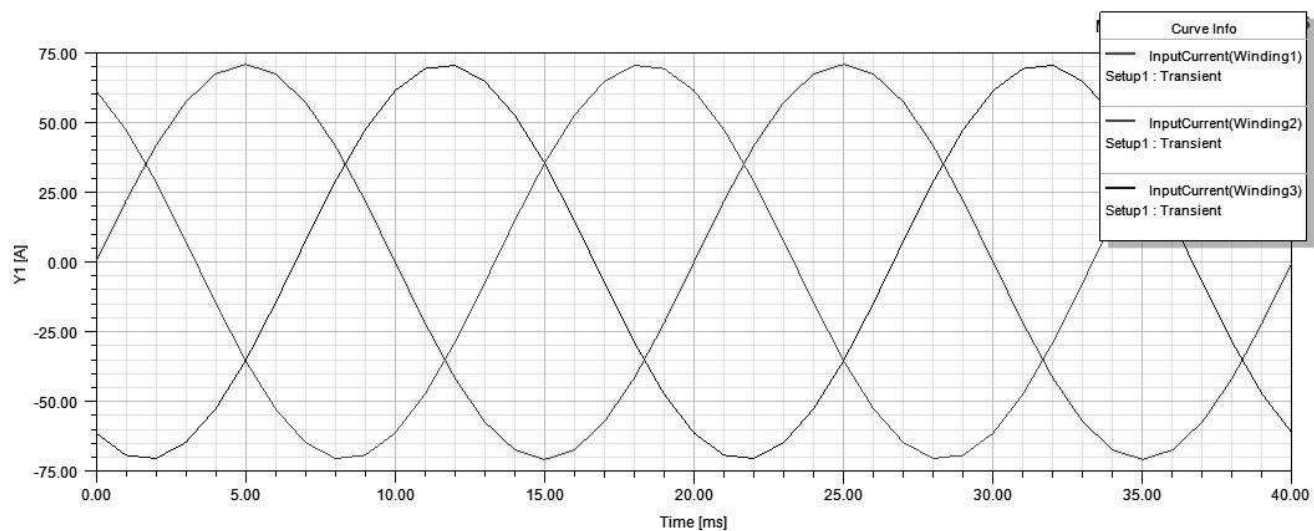


Рисунок 4.6 – Зависимость тока от времени

Для определения влияния потерь в роторе и статоре на систему управления, в окне *Excitations – Set Core Loss, Set Eddy Effects – General* устанавливаем необходимые галочки. Изменяем амплитуду подаваемого на обмотки статора тока, фиксируем значения и подбираем угол поворота ротора, соответствующий максимальному моменту, с учетом изменения нагрузки. Все изменения были определены при скорости равной номинальной 1500 об/мин. Полученные данные представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты настройки угла поворота ротора

I, А	$\omega = 1500$ об/мин	
	M_{cp} , Н·м	α , °
25	34,1	74
50	114	71
100	233	69
150	327	68

По полученным результатам можно сделать вывод, что при увеличении нагрузки, угол поворота ротора смещается в сторону q-оси двигателя, для поддержания максимального момента.

4.2 Расчет потерь в стали статора и ротора в функциях скорости и нагрузки

Исследование зависимости потерь от времени проводилось при изменении амплитуды тока, подаваемого на статор и изменении скорости вращения ротора. Графики изменения потерь при номинальных данных представлены на рисунках 4.7, 4.8, 4.9, 4.10.

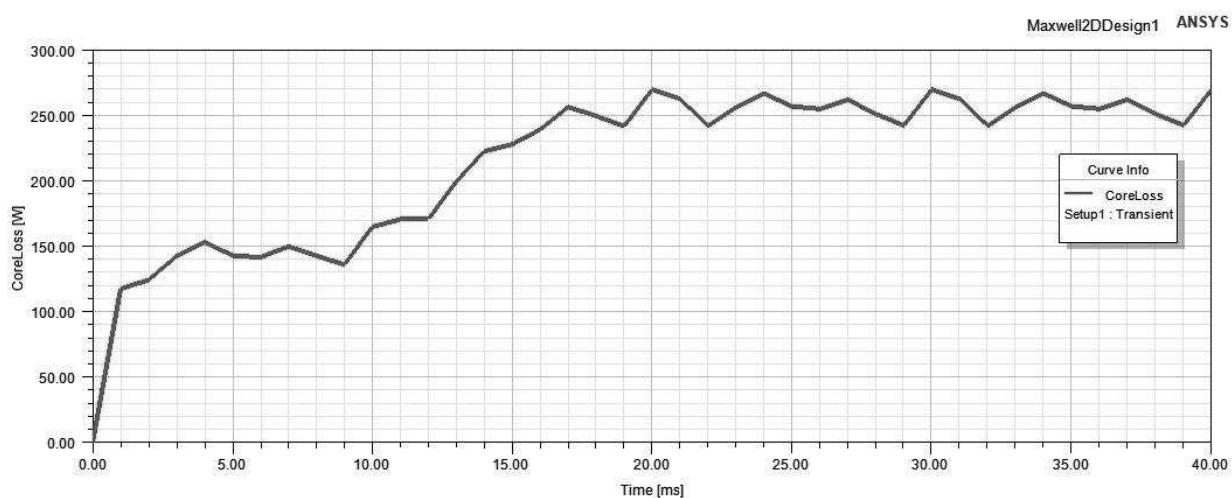


Рисунок 4.7 – Общие потери в стали рассчитанные методом Core Loss

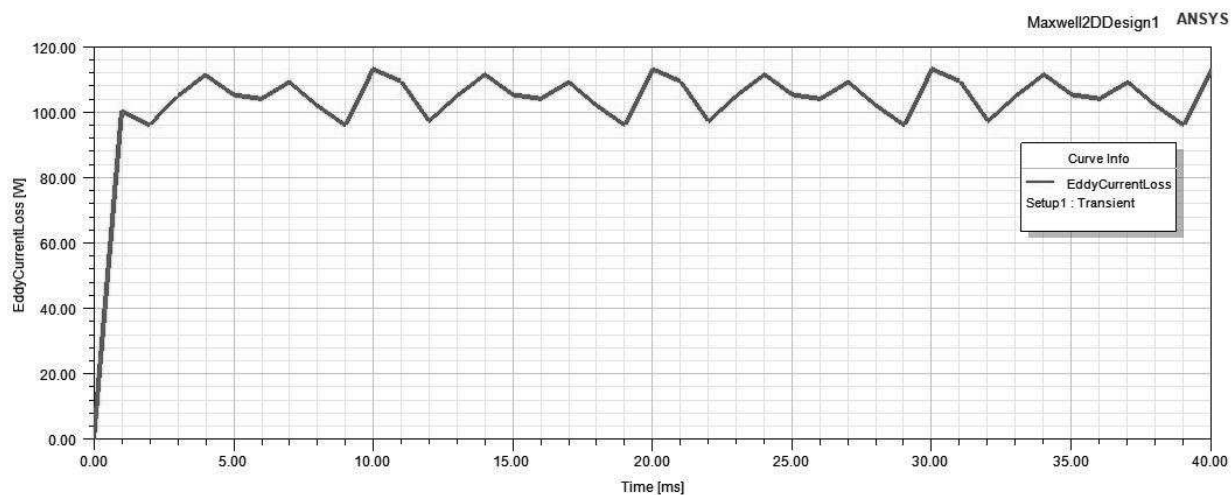


Рисунок 4.8 – Общие потери на вихревые токи рассчитанные методом Core Loss

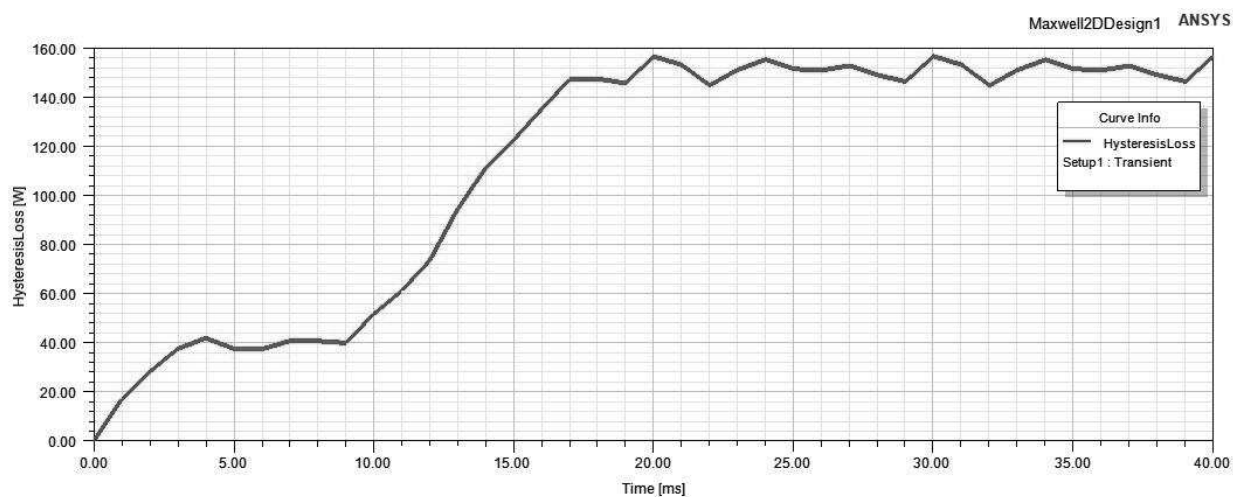


Рисунок 4.9 – Общие потери на гистерезис рассчитанные методом Core Loss

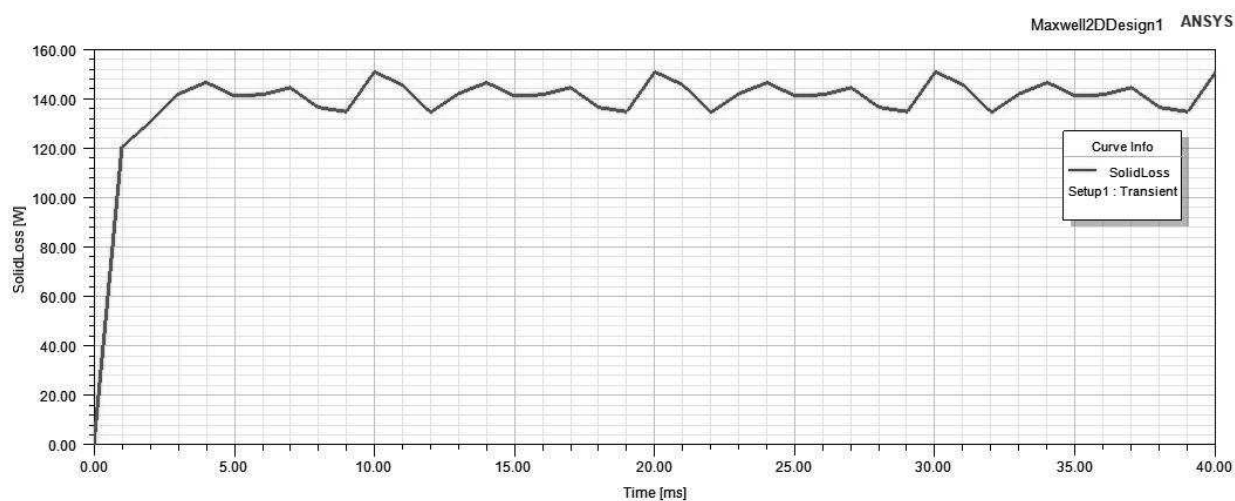


Рисунок 4.10 – Общие потери рассчитанные методом Solid Loss

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ

Лист

40

Значения потерь на вихревые токи, рассчитанные методом *Solid Loss* очень близки к значениям, полученным методом *Core Loss*. Сравним полученные данные при изменении нагрузки и скорости и запишем в таблицу 4.2 в относительных единицах.

Таблица 4.2 – Результаты потерь в стали

При $\omega = 1500$ об/мин и изменении тока от номинального значения, А				
	Solid Loss, о.е.	Потери на гистерезис, о.е.	Потери на вихревые токи, о.е.	Corel Loss, о.е.
I_H	1	1	1	1
$0,5 \cdot I_H$	0,39	0,51	0,48	0,47
$2 \cdot I_H$	1,42	1,32	1,38	1,34
$3 \cdot I_H$	1,66	1,46	1,62	1,55
При $I_H = 50$ А и изменении скорости от номинального значения, об/мин				
$0,1 \cdot \omega$	0,01	0,09	0,007	0,05
$0,5 \cdot \omega$	0,25	0,49	0,22	0,58
$2 \cdot \omega$	3,74	1,92	3,72	2,83

С увеличением амплитуды тока, подаваемого на обмотки статора, общие потери увеличиваются на 60%. Однако, при одинаковой величине момента электрические потери уменьшаются с регулированием скорости вниз от номинального значения.

При работе на повышенной скорости основной составляющей общих потерь в стали являются потери на вихревые токи. Вихревые токи зависят от квадрата частоты перемещающегося магнитного поля, поэтому, при работе в области высоких частот, они будут составлять основную часть потерь в железе.

Изменение потерь на вихревые токи, рассчитанные методом *SolidLoss* и *Core Loss* изменяются одинаково, при изменении нагрузки и скорости.

С помощью программы MS Excel построим график зависимости потерь от изменения нагрузки в относительных единицах. Полученный результат представлен на рисунке 4.11.

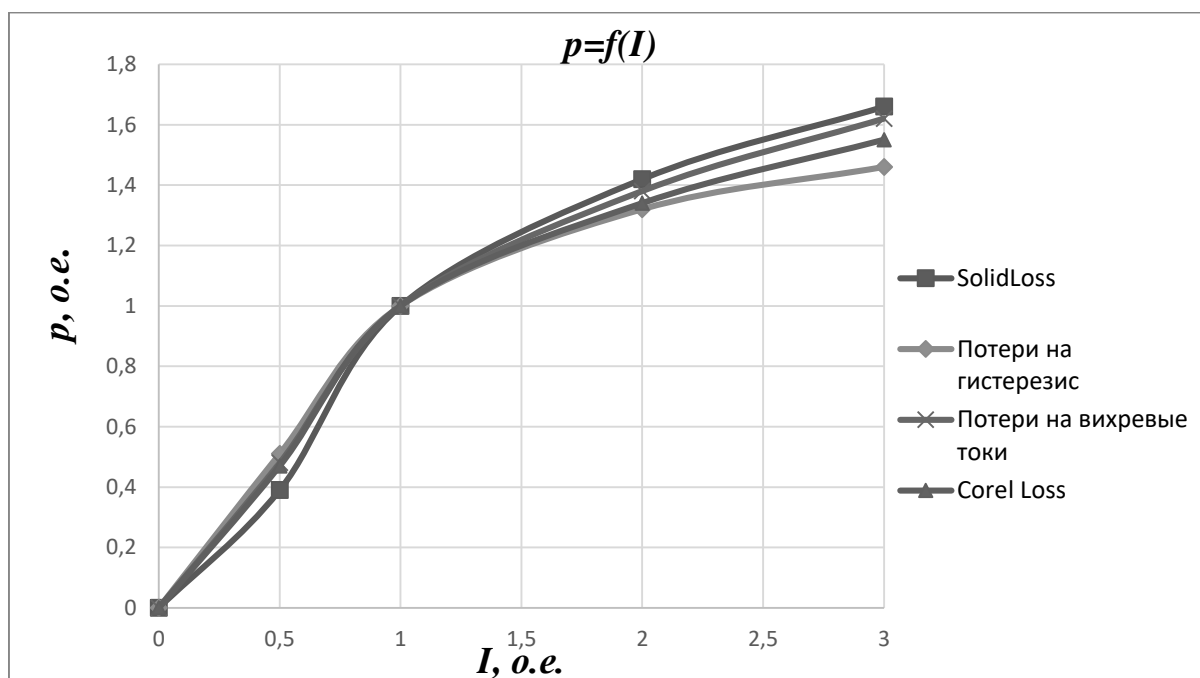


Рисунок 4.11– График изменения потерь от нагрузки

Аппроксимируем полученные графики и произведем регрессионный анализ результатов. Найдем по какой аналитической зависимости изменяются потери.

Регрессионный анализ в программе MS Excel – это статистический метод исследования, который показывает зависимость какого-либо параметра от одной или нескольких независимых переменных.

Получаем, что при изменении нагрузки потери возрастают по следующей функции:

$$P(I) = -0,01954 \cdot I^2 + 1,1032 \cdot I - 0,003, \quad (8)$$

где I – амплитуда тока, подаваемого на обмотки статора, о.е.;

P – магнитные потери, о.е.

Анализируя график (см. рисунок 4.11), можно увидеть схожесть формы кривой намагничивания в координатах $B-H$ и графика зависимости потерь на гистерезис и вихревые токи. Эта особенность подтверждает зависимость потерь в стали от величины индукции, причем потери на гистерезис и вихревые токи зависят от индукции примерно в равной мере.

Аналогично построим график изменения потерь от скорости (см рисунок 4.12).

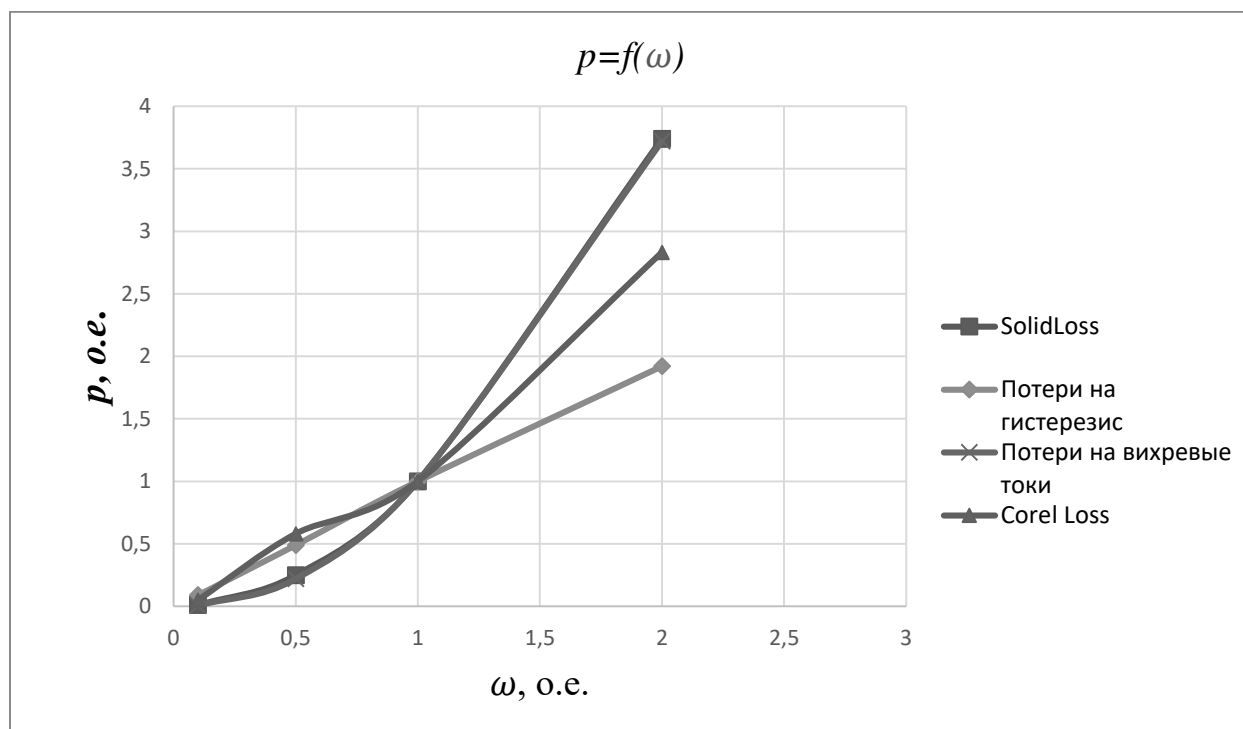


Рисунок 4.12– График изменения потерь от скорости

После аппроксимации получим функцию изменения потерь от скорости:

$$P(\omega) = 1,0629 \cdot \omega^{1,44} \quad (9)$$

Анализируя график зависимости потерь в стали от скорости (см. рисунок 4.12), можно сделать вывод, что потери на вихревые токи от тока увеличиваются в квадрате, а потери на гистерезис почти линейно. Это говорит о разной степени зависимости компонент потерь от скорости. Общие потери от тока зависят от тока согласно регрессионной зависимости (9).

После расчёте потерь в ANSYS Maxwell были сняты значения напряжений и токов, и, с помощью программы MS Excel, рассчитаны значения коэффициента мощности при изменении нагрузки и скорости вращения ротора. Номинальным данным соответствует $\cos\varphi = 0,72$. Полученные значения коэффициента мощности сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Сравнение коэффициента мощности

	Изменении тока при номинальной скорости, А			Изменении скорости при номинальном токе, об/мин		
	$0,5 \cdot I_H$	$2 \cdot I_H$	$3 \cdot I_H$	$0,1 \cdot \omega$	$0,5 \cdot \omega$	$2 \cdot \omega$
$\cos\varphi$	0,58	0,66	0,59	0,61	0,67	0,7

Построим график изменения $\cos\varphi$ в относительных единицах при изменении нагрузки и скорости (см. рисунок 4.13).

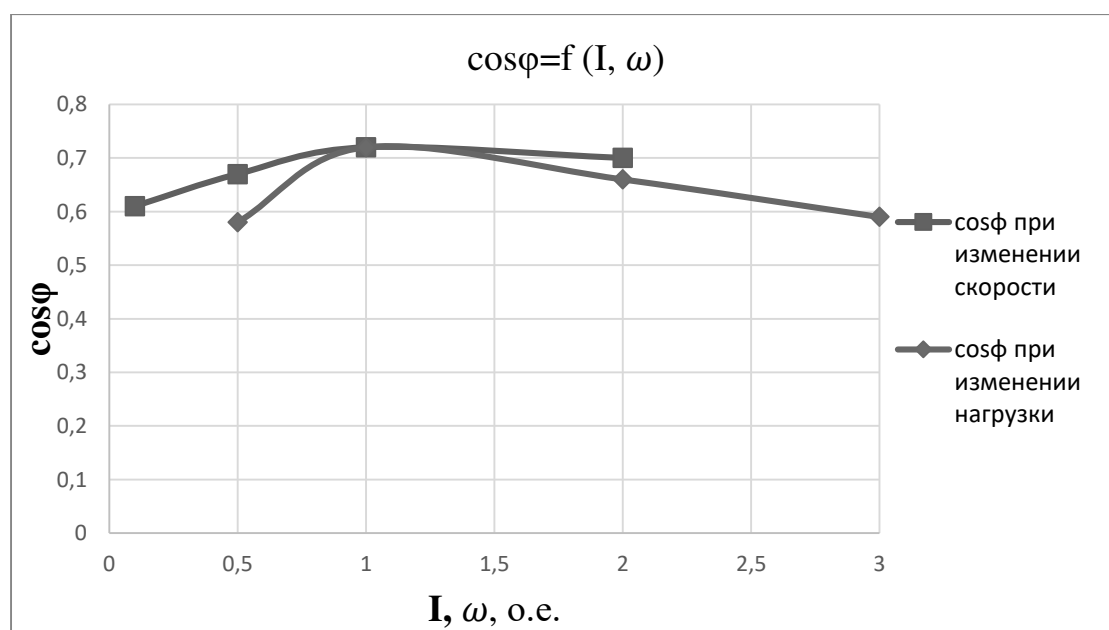


Рисунок 4.13– График изменения коэффициента мощности от нагрузки и скорости

Наилучший коэффициент мощности получается в номинальном режиме работы. Низкие значения при перегрузке объясняются большим током намагничивания из-за насыщения магнитной системы. При малых нагрузках при постоянном токе возбуждения уменьшается доля активной мощности к полной.

При изменении скорости реактивная и активная мощности изменяются линейно, но из-за разницы в значениях коэффициентов пропорциональности коэффициент мощности несколько возрастает при увеличении скорости.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		45

5 РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫБОРУ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ

Программа «ANSYS Maxwell» позволяет рассчитать потери в сердечнике и потери в меди двумя способами.

Использование аналитического метода расчета потерь (*CoreLoss*) основывается на коэффициентах, которые рассчитываются с помощью конкретных графиков потерь. Сложностью данного расчета является правильное определение свойств материала, так как необходимые данные доступны не для каждого типа стали.

Исследование полевого метода (*SolidLoss*) является более точным для определения потерь в стали. Это потери в массиве, которые определяются из распределения рассчитанной плотности вихревых токов.

Полученные значения потерь на вихревые токи методом *SolidLoss* получились близкими к значению потерь на вихревые токи, рассчитанные методом *CoreLoss*, поэтому могут быть использованы обе методики расчета потерь.

Однако, для учета влияния потерь в стали на систему управления необходимо использовать только метод *SolidLoss*, так как только в этом случае моделируются вихревые токи в стали.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе был произведен аналитический обзор синхронных реактивных двигателей, в котором рассмотрены различные машины переменного тока и проведен их сравнительный анализ. Анализ показал все отличительные преимущества синхронных двигателей по сравнению с асинхронными. Активное развитие СРД и целесообразность их применения обусловлена высокой энергоэффективностью и экономичностью, которая достигается за счет конструктивных особенностей. Простота конструкции синхронного реактивного двигателя выражается, в отсутствии постоянных магнитов и обмотки ротора. Данный пункт является важным в самом двигателе. Из которого вытекает и остальные его положительные стороны.

Также были рассмотрены различные виды потерь, возникающие в синхронной реактивной машине. Выявлены основные причины возникновения и параметры, влияющие на них. К основным видам потерь в синхронной реактивной машине можно отнести: механические, электрические потери в обмотках статора и магнитные потери на гистерезис и вихревые токи, зависящие от свойств материала.

Основной целью работы было исследование потерь в стали СРД. Для этого была реализована модель исследуемого двигателя в среде ANSYS Maxwell. Была поэтапно описана методика построения модели двигателя. Построение статора было выполнено с помощью графических инструментов самого Maxwell, а конструкция ротора создана и импортирована из программной среды SolidWorks. Кроме того, была поэтапно описана методика построения модели двигателя.

Исследование проводилось по двум методикам расчета потерь в Maxwell: аналитический и полевой. Были получены зависимости магнитных потерь в стали от времени в разных скоростных и нагрузочных режимах, произведен их регрессионный анализ. По проведенному исследованию можно заключить, что

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

значительное увеличение нагрузки и скорости оказывает различную степень влияния на изменение потерь.

Основным преимуществом расчета потерь в ANSYS Maxwell 2D является то, что они дают наглядное представление обо всех протекающих в двигателе процессах во время работы. Так же программы упрощают процесс исследования, предоставляя широкие возможности для настройки геометрии и параметров машин.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вольдек, А.И. Электрические машины/ А.И. Вольдек. Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840с.
2. Горожанкин, А.Н. Вентильный электропривод с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения: Дис. - канд. техн. наук : Специальность 05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы. – Челябинск, 2010. – 138 с.
3. ГОСТ 27471-87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005. – 13 с.
4. Григорьев, М.А. Вентильный электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения: монография / М.А. Григорьев; под ред. Ю.С. Усынина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 159 с.
5. Григорьев, М.А. Электропривод с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения / М.А. Григорьев // Изв. вузов. Электромеханика. – 2013. – № 4. – С. 32 – 36.
6. Дмитриевский, В.А. Экспериментальное сравнение асинхронного и синхронного реактивного электродвигателей / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев, А.С. Поздеев, С.Х. Ошурбеков, А.Ф. Михалицын // Научн. техн. конф.– ЭПТТ, 2015. – С. 19 – 22.
7. Драчев Г. И. - Теория электропривода. Учебное пособие Часть 2. – Челябинск, 2006, 196 стр.
8. Единый центр поддержки продуктов ANSYS в России и странах СНГ. ANSYS Maxwell. – <https://cae-expert.ru/product/ansys-maxwell> (дата обращения 15.05.2020).
9. Казакбаев В.М. Разработка высокоэффективного синхронного реактивного двигателя: дис. на соискание ученой степени кан. техн. наук / В.М. Кабакаев – Екатеринбург.: Изд-во ФГАОУ ВПО, 2016. – 127 с.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		49

10. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 560с., ил.

11. Конструктор. Электропривод. – <https://konstruktions.ru/podrobnee-elekt/sinxronnye-reaktivnye-dvigateli-perspektivny-vo-mnogix-promyshlennyx-primenenijax-2144.html> (дата обращения 10.05.2020).

12. Корсун М. М. Об использовании граничных элементов при моделировании электромагнитных процессов с существенным влиянием вихревых токов / М. М. Корсун, И. М. Ступаков, М. Э. Рояк // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – Новосибирск.: Изд-во НГТУ, – 2010. – № 2. – С. 100–109.

13. КОСПА. Синхронные реактивные двигатели – <https://www.cospa.ru/news/publications/sinkhronnye-reaktivnye-dvigateli-srd/> (дата обращения 10.05.2020).

14. Промышленные технологии. Область применения синхронных электродвигателей – <https://www.tehnology-pro.ru/oblast-primeneniya-sinkhronnykh-elektrodvigatelej.html> (дата обращения 12.05.2020).

15. Садовский, Л. А. Перспективы применения новых типов двигателей в современных регулируемых и следящих электроприводах / Л. А. Садовский // Приводная техника. – 2003. – № 2 (42). – С. 31–40.

16. Розанов, Ю. К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники / Ю. К. Розанов // Электричество. – 2005. – № 7. – С. 52–61.

17. Разработка синхронного реактивного электропривода / В.А. Дмитриевский, В.А. Прахт, В.М. Казакбаев, А.С. Поздеев, С.Х. Ошурбеков, А.Ф. Михалицын // Автоматизация в электроэнергетики и электротехнике. – Пермь: ПНИПУ. – 2015. – С. 89–92.

18. Удельные показатели электропривода с синхронным реактивным двигателем независимого возбуждения / Ю.С. Усынин, М.А. Григорьев, К.М. Виноградов, А.Н.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		50

Горожанкин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2008. – Вып. 9. – №11(59). – С. 52–53.

19. Центральный металлический портал РФ. Сталь электротехническая 2013. – http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/ste/2013 (дата обращения 18.05.2020).

20. Центральный металлический портал РФ. Сталь электротехническая 2412. – http://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/ste/2412 (дата обращения 18.05.2020).

21. Электрик Инфо. Современные синхронные реактивные двигатели. – <http://elektrik.info/main/school/1201-sovremennye-sinhronnye-reaktivnye-dvigateli.html> (дата обращения 10.05.2020).

22. Электроприводы с синхронной реактивной машиной независимого возбуждения для станов холодной прокатки труб / Ю.С. Усынин, С.П. Лохов, М.А. Григорьев, А.Н. Шишков, Е.В. Белоусов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия “Энергетика”. – 2012. – Вып. 17. – №16(275). – С. 107 – 110.

23. A direct torque control system for synchronous electric drivers / A. Gorozhankin, A. Shishkov, E. Belousov, D. Sychev, S. Kinas // Russian Electrical Engineering. – 2014. Volume 85. Issue 10. P. 616-618

24. ANSOFT Maxwell. Расчёт асинхронного двигателя. – <http://ansoft-maxwell.narod.ru/dragon/example4.2.html> (дата обращения 25.04.2020).

25. IEC 60034-2-3 ed1.0, Rotating electrical machines- Part 2-3: Specific test methods for determining losses and efficiency of converter-fed AC induction motor.

26. J. Estima, A. J. M. Cardoso Efficiency Analysis of Synchronous Reluctance Motors, in International Conference on Engineering – ICEUBI, 27-29 November 2013.

27. Tikhonova, O. Loss calculation of induction motor with ring windings by “ANSYS Maxwell” / O.Tikhonova, I. Malygin, R. Beraya, N. Sokolov, A. Plastun // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering 2018. – С. 63–66.

					ЮУрГУ-13.04.02.2020.184.01 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51