

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования

«Южно-Уральский государственный университет (НИУ)»

ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Факультет «Энергетический»

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ С.А. Ганджа

_____ 2019 г.

Моделирование режимов работы асинхронного двигателя мощностью 4 кВт в
системе ПЧ-АД

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ – 130302.2019.175. ПЗ ВКР

Руководитель работы,

_____ Н.Ю. Сидоренко

_____ 2019 г.

Автор работы

студент группы П-473

_____ И.И. Лукманов

_____ 2019 г.

Нормоконтроллер,

_____ Н.Ю. Сидоренко

_____ 2019 г.

АННОТАЦИЯ

Лукманов И.И. Моделирование режимов работы асинхронного двигателя мощностью 4 кВт в системе ПЧ-АД – Челябинск: ЮУрГУ, Политехнический институт, Энергетический; 2019, 62 с., 17 ил., 8 табл., библиогр. список – 10 наим.

В данной выпускной квалификационной работе проводится исследование режимов работы асинхронного двигателя на холостом ходу и в режиме малых нагрузок.

В первой части было проведено экспериментальные исследования работы АД с короткозамкнутым ротором.

Во второй части был произведен электромагнитный расчет по методике Копылова, для определения внутренних параметров двигателя.

Также был проведен поверочный расчет асинхронного двигателя в Maxwell, с целью проверки полученных данных и визуализации магнитных полей в машине.

В последней части представлено моделирование режимов работы асинхронного двигателя в Jigrein.

При разработке квалификационной работы были использованы следующие программные средства: *Компас, Microsoft Office, Jigrein, Ansys Electronics Desktop – Maxwell.*

| | | | | | | | | |
|-----------------|-------------|-----------------|--------------|-------------|---|----------------------|-------------|---------------|
| | | | | | 130302.2019.175.ПЗ | | | |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подп.</i> | <i>Дата</i> | Моделирование режимов работы асинхронного двигателя мощностью 4 кВт в системе ПЧ-АД | <i>Лит</i> | <i>Лист</i> | <i>Листов</i> |
| <i>Разраб.</i> | | Лукманов | | | | | | 3 |
| <i>Провер.</i> | | Сидоренко | | | | ЮУрГУ Кафедра ТОЭ | | |
| <i>Н.контр.</i> | | Сидоренко | | | | | | |
| <i>Утв.</i> | | Ганджа | | | | | | |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ..... | 6 |
| 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ..... | 7 |
| 3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ..... | 10 |
| 3.1 Выбор главных размеров | 10 |
| 3.2 Определение Z_1 , w_1 и площади поперечного сечения провода обмотки статора | 12 |
| 3.3 Расчет размеров зубцовой зоны статора и воздушного зазора | 15 |
| 3.4 Расчет ротора..... | 19 |
| 3.5 Расчет магнитной цепи..... | 22 |
| 3.6 Параметры рабочего режима..... | 26 |
| 3.7 Расчет потерь..... | 30 |
| 3.8 Расчет рабочих характеристик..... | 33 |
| 3.9 Расчет пусковых характеристик..... | 36 |
| 3.10 Расчет пусковых характеристик с учетом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеивания..... | 40 |
| 4 ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ В ПРОГРАММЕ ANSYS ELECTRONICS MAXWELL | 47 |
| 4.1 Обзор пакета Ansys Maxwell..... | 47 |
| 4.2 Программные модули Ansys Maxwell..... | 47 |
| 4.3 Моделирование в программе <i>Ansys Electronics Desktop – Maxwell</i> | 48 |
| 5 МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В JIGREIN..... | 55 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 59 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК | 60 |

ВВЕДЕНИЕ

Современные машины переменного тока широко используются благодаря относительно простой конструкции и высокой надёжности в работе. Известно, что за счёт уменьшения амплитуды питающего напряжения постоянной частоты можно получить минимум потерь, т.е. обеспечить энергосберегающий режим работы и уменьшить нагрев двигателя. Но этот способ целесообразен для приводов, где требуется кратковременное снижение скорости вращения двигателя и энергетика процессов регулирования не играет существенной роли. Существует большое количество электроприводов с перемежающейся нагрузкой, при которой за отрезками времени с большим моментом статической нагрузки следуют значительные промежутки времени, когда ток нагрузки падает до холостого хода (прессы, толкатели, привода подачи на станках). В таких электроприводах целесообразно использовать регулируемые преобразователи напряжения, которые позволяют снижать напряжение на статоре двигателя при малых моментах статической нагрузки, и, как следствие, уменьшать потери холостого хода двигателя и повышать коэффициент мощности электроустановки. [1]

Интерес представляет исследование оптимальной кривой минимума тока статора при работе двигателя на холостом ходу и в режиме малых нагрузок. Эта кривая может быть сформирована в системе тиристорный преобразователь напряжения – асинхронный двигатель (ТПН-АД). [2]

Во введении показана актуальность, цель исследования, методики проведения расчетов, теоретическая и практическая значимость работы. Первая глава посвящена постановке задачи. Во второй главе рассмотрена экспериментальная часть работы. В третьей главе выполнен электромагнитный расчет по методике Копылова [3]. В четвертой главе приведены результаты расчета в пакете Maxwell. В пятой главе приведены результаты моделирования в Jigrein. В заключении подводятся итоги, формируются окончательные выводы по рассматриваемой теме.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для исследования предлагаемых режимов работы АД и расчёта энергетической эффективности электроустановки требуется создание адекватной модели и её экспериментальное подтверждение.

С этой целью, мы провели экспериментальные исследования работы АД с короткозамкнутым ротором. Полученные результаты приведены во второй главе. В результате эксперимента были получены характеристики, которые подтвердили характер изменения тока при работе на холостом ходу и пониженной нагрузке.

По характеристикам можно определить значение напряжения питания, при котором наблюдается минимум значение ток статора, следовательно, при работе АД на холостом ходу с помощью частотного преобразователя (ЧП) можно сформировать это напряжение.

Следующей задачей было получение параметров двигателя, для создания достоверной модели и проведения дальнейших исследований с помощью компьютерных технологий.

Для реализации этой задачи был проведён электромагнитный расчёт по методике Копылова [3], а также поверочный расчёт в Ansys Maxwell.

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | <i>130302.2019.175.ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 6 |

2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание лабораторной установки.

В качестве нагрузки АД используем механически соединенную с ним машину постоянного тока (МПТ), работающую в режиме электромагнитного тормоза. Для этого необходимо обеспечить направление вращающего момента МПТ противоположное направлению вращения вала АД. Изменяя токи питания МПТ, можно создавать требуемые моменты сопротивления АД.

Паспортные данные исследуемого АД. Тип АОК2 – 51 – 6 Т2 - двигатель с фазным ротором, используем при короткозамкнутой обмотке ротора, 3 ф ~ 50 Гц, статор Δ/Y 220/380 В, 16/10 А, ротор Y, 112 В, 21 А, 4 кВт, 955 об/мин, КПД 82%, $\cos\varphi = 0,78$, режим S1, кл. изол. В, вес 108 кг.

Паспортные данные МПТ. Тип 2ПН160МУХЛ4, 4,5 кВт, 220 В, 24,2 А, возбуждение независимое 220 В, 1,48 А, КПД 79,5%, 1000/3000 об/мин, режим S1, кл. изол. F, IP23, вес 141 кг.

Источником изменяемого напряжения является индукционный регулятор.

Сняты регулировочные характеристики при работе АД на холостом ходу, регулирование осуществляется за счет снижения напряжения. Результаты эксперимента представлены в таблице 1.2.

Таблица 1.1 – Исследование АД на холостом ходу.

| № | U _л , В | I _л , А | P ₁₀ , кВт | Q, кВАр | cosφ | n, об/мин | P ₂ , кВт | S, ВА |
|---|--------------------|--------------------|-----------------------|---------|------|-----------|----------------------|-------|
| 1 | 219,7 | 2,5 | 0,323 | 0,89 | 0,34 | 996 | 3,14 | 951 |
| 2 | 221 | 2,41 | 0,31 | 0,83 | 0,35 | 996 | 3,14 | 880 |
| 3 | 200 | 2,29 | 0,296 | 0,74 | 0,37 | 995 | 3,13 | 794 |
| 4 | 180 | 2,17 | 0,27 | 0,596 | 0,4 | 994 | 3,13 | 677 |
| 5 | 150 | 1,82 | 0,23 | 0,41 | 0,47 | 990 | 3,12 | 473 |
| 6 | 141 | 1,75 | 0,22 | 0,36 | 0,52 | 989 | 3,12 | 427 |
| 7 | 129,7 | 1,67 | 0,21 | 0,31 | 0,56 | 987 | 3,11 | 375 |

| | | | | | | | | |
|----|-------|------|------|-------|-------|-----|------|-----|
| 8 | 120,5 | 1,65 | 0,2 | 0,27 | 0,58 | 985 | 3,10 | 350 |
| 9 | 110,3 | 1,63 | 0,19 | 0,23 | 0,61 | 981 | 3,09 | 314 |
| 10 | 100 | 1,53 | 0,19 | 0,19 | 0,717 | 975 | 3,07 | 285 |
| 11 | 90,5 | 1,53 | 0,18 | 0,16 | 0,751 | 969 | 3,05 | 240 |
| 12 | 79,9 | 1,55 | 0,17 | 0,13 | 0,793 | 959 | 3,02 | 214 |
| 13 | 70 | 1,63 | 0,17 | 0,11 | 0,86 | 944 | 2,97 | 197 |
| 14 | 60,3 | 1,8 | 0,16 | 0,092 | 0,85 | 919 | 2,89 | 188 |
| 15 | 50,8 | 2,13 | 0,16 | 0,09 | 0,85 | 866 | 2,7 | 187 |

На рисунке 1.1 представлены экспериментальные рабочие характеристики АД на холостом ходу.

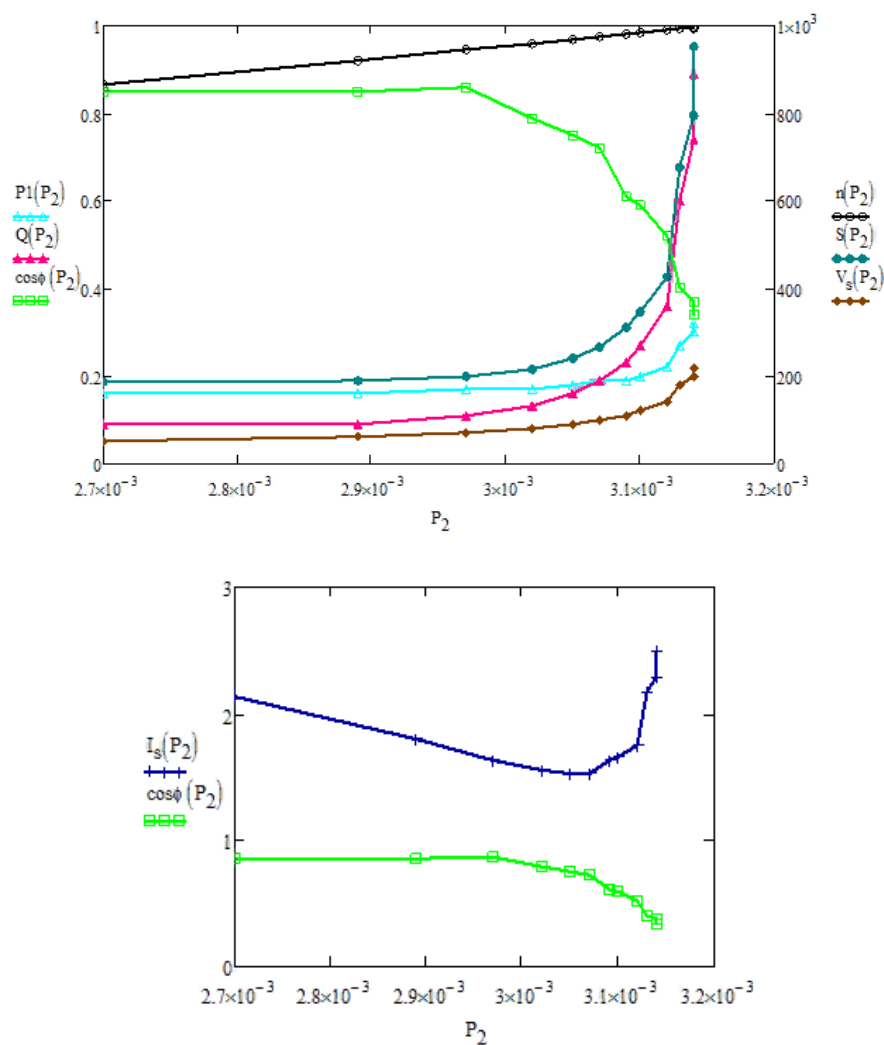


Рисунок 2.1 – Рабочие характеристики на холостом ходу

Из эксперимента мы видим, что на холостом ходу ($M = 0$) ток в статоре уменьшился на 64% при работе на оптимальном сниженном напряжении по сравнению с работой на номинальном напряжении. Следовательно, без ущерба для работы на холостом ходу и в режиме малых нагрузок можно понизить напряжение на обмотках статора, при этом улучшаются как $\cos\phi$, так и коэффициент полезного действия.

Задачей дальнейшего исследования будет построение регулятора, позволяющего формировать оптимальное пониженное напряжение [2].

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 9 |
| Изм | Лист | № докум. | Подпись | Дата | 130302.2019.175.ПЗ | | | | |

3 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Электромагнитный расчет производится по методике И. П. Копылова [3].

При разработке электрической машины задаются рядом исходных величин, которые будут являться номинальными данными спроектированной машины. Для асинхронной машины такими данными являются следующие: номинальная мощность _____, напряжение $2p = 6$, исполнение по степени защиты IP44, класс нагревостойкости изоляции В.

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 [3].

Согласно исходным данным высота оси вращения $h=0,112$ м, тогда по [3, табл. 9.8] выбираем внешний диаметр статора $D_a=0,195$ м. Станина выбирается литая.

По [3, табл. 9.9] $k_D=0,7$, следовательно внутренний диаметр статора определяется по формуле (1).

(1)

Полюсное деление определим по формуле (2).

(2)

Расчетная мощность определяется по формуле (3).

(3)

где – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению.

По [3, рис. 9.20] определяем

По исходным данным $\eta=0,83$ и $\cos\varphi=0,8$

Тогда получим:

Электромагнитные нагрузки (предварительно по [3, рис. 9.23, а]).

Электромагнитная нагрузка:

А/м

Индукция в воздушном зазоре:

Тл

Обмоточный коэффициент (предварительно для однослойной обмотки):

Тл

Синхронная частота вращения:

(4)

Расчетная длина магнитопровода по формуле (5).

(1)

где α – коэффициент формы поля

Коэффициент полюсного перекрытия: β

Определим соотношение по формуле (6).

—

(6)

Согласно [3, рис. 9.25] коэффициент 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:

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 [3, рис. 9.26]:

М

М

Тогда число пазов статора определяется по формуле (7).

$$\frac{Z_1}{2} = \frac{M}{\alpha} \quad (7)$$

$$Z_1 = \frac{2M}{\alpha}$$

Примем $\alpha = 0.8$, тогда число пазов на полюс и фазу найдем по формуле (8).

$$Z_1 = \frac{2M}{0.8} = 2.5M \quad (8)$$

$$Z_1 = 2.5M$$

Зубцовое деление статора (окончательно) определим по формуле (9).

(9)

Полученное значение входит в указанные выше пределы.

Число эффективных проводников в пазу (предварительно, при $a=1$) по формуле (10).

(10)

где — номинальный ток обмотки статора, А:

(11)

тогда:

Принимаем $a = 1$, тогда:

(12)

Округляя до ближайшего целого значения, принимаем

Окончательное число витков в фазе обмотки определим по формуле (13).

(13)

Окончательное значение линейной нагрузки:

(14)

Выбираем концентрическую однослойную обмотку из круглого провода.

Магнитный поток определяется по формуле (15).

(15)

Индукция в воздушном зазоре определяется по формуле (16).

(16)

—

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

Плотность тока в обмотке статора (предварительно) вычислим по формуле (17).

(17)

—

Значение AJ определим из [3, рис. 9.27 б] $AJ = 180 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{м}^3$.

Тогда:

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно) находим по формуле (18).

(18)

Примем

(19)

—

Тогда выбираем обмоточный провод ПЭТ-155 по [3, прил. ПЗ.1]:

Плотность тока в обмотке статора (окончательно) определяется по формуле (20).

(20)

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.

В машинах общего назначения с номинальным напряжением до 660 В обмотки укладывают в полуоткрытые трапециевидные пазы. Форму паза принимаем по [3,рис 9.29 а]. По способу изолирования выбираем лакировку.

Предварительно, по [3, табл. 9.12] принимаем:

Тл, Тл.

По [3, табл. 9.13] определяем коэффициент заполнения сердечника сталью

Ширина зубца статора определяется по формуле (21).

(22)

Высота ярма статора определяется по формуле (22).

(22)

Размеры паза в штампе. Угол наклона грани клиновой части в трапецеидальных пазах у двигателей $h=112$ мм обычно . Так как $h=112$ мм высоту шлица паза принимаем м.

По [3, табл. 9.16] ширина шлица паза м. (23)

(24)

(25)

Расчет паза «в свету» с учетом припуска на сборку. По [3, табл. 9.14] определяем припуски по ширине и высоте паза. По ширине . По высоте .

Тогда размеры «в свету» определяются по формуле (26). (26)

Высота клиновой части паза определяется по формуле (27).

(27)

Тогда:

(28)

Площадь поперечного сечения паза, которая остается свободной для размещения проводников обмотки определяется по формуле (29).

(29)

где: — площадь, занимаемая корпусной изоляцией в пазу, m^2 , которая определяется по формуле (30)

(30)

где — односторонняя толщина изоляции в пазу. По [3, табл. 3.1] выбираем

(31)

где: — площадь, занимаемая прокладками в пазу. В данном случае в прокладке нет необходимости.

Из этого следует:

(32)

Для проверки правильности размещения обмотки в пазах рассчитаем значение коэффициента заполнения паза по формуле (33)

(33)

Полученное значение выше рекомендованного.

Рассчитанные размеры пазов статора сведены в таблицу 3.1:

Таблица 3.1 – Размеры пазов статора.

| , мм | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм | , мм |
|------|------|------|------|------|------|------|
| 15,6 | 13,3 | 0,5 | 1,65 | 6,3 | 8,6 | 3 |

Определим воздушный зазор по формуле (34).

(34)

Эскиз паза статора приведен на рисунке 3.

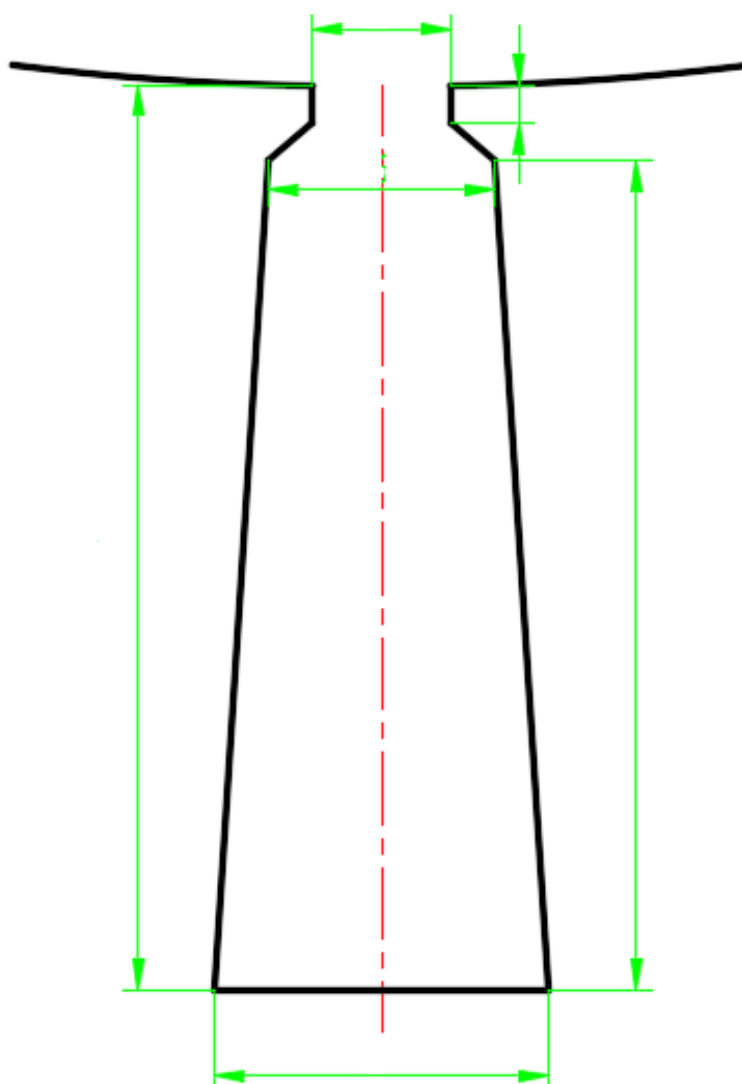


Рисунок 3.2 – Эскиз паза статора проектируемого двигателя

3.4 Расчет ротора

Число пазов ротора по [3, табл. 9.18]:

Внешний диаметр ротора:

(35)

Длина магнитопровода ротора

Зубцовое деление ротора определяется по формуле (36).

(36)

Сердечник ротора выполнен с непосредственной посадкой на вал без шпонки и промежуточной втулки. Диаметр вала рассчитывается по формуле (37).

(37)

где коэффициент определен по [3, табл. 9.19].

Ток в обмотке ротора определится по формуле (38).

(38)

где: — коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания, на отношение I_1/I_2 , который рассчитывается по формуле (39).

(39)

— коэффициент приведения токов по формуле (40)

(40)

Так как пазы ротора выполняем без скоса — , тогда:

Площадь поперечного сечения стержней (предварительно) определяется по формуле (41).

(41)

где плотность тока в обмотке ротора

Паз ротора определяем по [3, рис. 9.41a] и принимаем:

$10-3$ м, $h_{шр}=0,75 \cdot 10-3$ м и $h'_{ш}=0,3 \cdot 10-3$ м.

Так как зубцы ротора параллельные, ширину зубца определим по формуле (42).

(42)

(43)

Полная высота паза определится по формуле (44).

(44)

Уточним площадь поперечного сечения стержней по формуле (45).

(453)

Полная высота паза ротора рассчитывается по формуле (46).

(46)

Плотность тока в стержне определяется по формуле(47).

(47)

Короткозамыкающие кольца выбраны по [3, рис. 9.37б] (с литой обмоткой)

— (48)

Токи в кольце рассчитываются по формуле (49).

— (49)

—

Площадь поперечного сечения замыкающих колец рассчитывается по формуле (50).

— (50)

где $\rho = 0,85$ – плотность тока в замыкающих кольцах.

Рассчитаем размеры колец. Высота сечения кольца рассчитывается по формуле (51)

(51)

Ширина замыкающих колец:

— (52)

Средний диаметр замыкающих колец:

(53)

Таблица 3.2 – Размеры пазов ротора.

| , мм | , мм | , мм | , мм | , мм | мм | мм |
|------|------|------|------|------|------|-----|
| 26,9 | 21,8 | 0,5 | 6,5 | 1,6 | 0,75 | 0,3 |

Эскиз паза ротора приведен на рисунке 4.

Эскиз поперечного разреза спроектированной части двигателя приведен на рисунке 5.

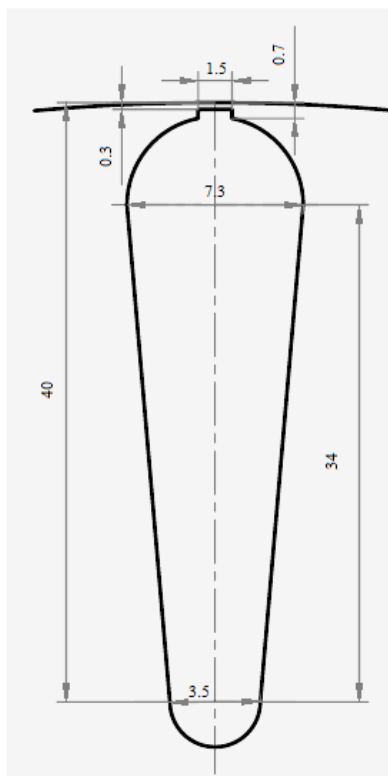


Рисунок 3.3 – Эскиза паза ротора проектируемого двигателя

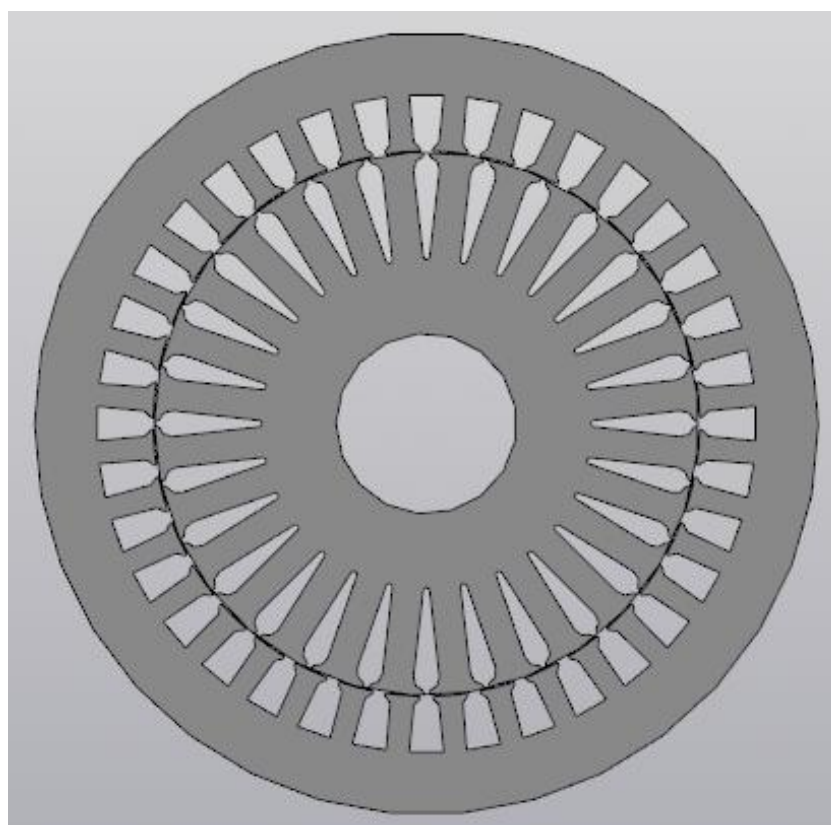


Рисунок 3.4 – Эскиз поперечного разреза спроектированной части двигателя.

3.5 Расчет магнитной цепи

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

130302.2019.175.ПЗ

Лист

22

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 160 мм выбираем электротехническую сталь марки 2013 толщиной 0,5 мм.

Магнитное напряжение воздушного зазора рассчитывается по формуле (54).

$$\text{---} \quad (54)$$

где --- – коэффициент воздушного зазора определяется по формуле (56).

$$\text{---} \quad (55)$$

$$\text{---} \quad (56)$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора определяется по формуле (57).

$$\text{---} \quad (57)$$

где --- – расчетная высота зубца статора (--- , --- – расчетная напряженность поля в зубце.

Расчетная индукция в зубце рассчитывается по формуле (58).

$$\text{---} \quad (58)$$

Расчет напряженность поля по [3, табл. П1.10] --- А/м.

Тогда:

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора определяется по формуле (59).

(59)

По таблице [3, табл. 9.20] при зубцах с рисунка [3, рис. 9.40а] имеем:

Индукция в зубце ротора рассчитывается по формуле (60).

(60)

Исходя из полученного значения индукции по [3, табл. П1.11] примем
А/м.

Тогда:

Коэффициент насыщения зубцовой зоны определяется по формуле (61).

(61)

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 рассчитывается по формуле (62).

(62)

где l – длина средней силовой линии в ярме статора определяется по формуле (63). При отсутствии аксиальных каналов получим:

(63)

Индукция в ярме статора определяется по формуле (64).

(64)

При отсутствии радиальных вентиляционных каналов.

По [3, табл. П1.9] Тл, тогда получим:

Магнитное напряжение ярма ротора рассчитывается по формуле (65)
(65)

где – длина средней силовой линии в ярме ротора.

_____ (66)

_____ (67)

Индукция в ярме ротора рассчитывается по формуле (68).
(68)

По [3, табл. П 1.9] напряженность ярма ротора Тл.

Тогда получаем:

Магнитное напряжение на пару полюсов определится по формуле (69).
(69)

Коэффициент насыщения магнитной цепи можно рассчитать по формуле
(70).
(70)

—

Намагничивающий ток можно рассчитать по формуле (71).
(71)

Относительное значение тока намагничивания определяется по формуле (72).

(72)

3.6 Параметры рабочего режима.

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора , ротора или приведенные к числу витков обмотки статора сопротивление ротора , сопротивление взаимной индуктивности и расчетное сопротивление , введением которого учитывают влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Активное сопротивление обмотки статора можно рассчитать по формуле (73).

(73)

(Для класса нагревостойкости изоляции В расчетная температура ; для медных проводников ; – коэффициент увеличения активного сопротивления фазы обмотки от действия эффекта вытеснения тока, примем)

Длина проводников фазы обмотки определяется по формуле (74).

(74)

(75)

Длина пазовой части равна длине сердечника машины:

Для выпннй обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус $B=0,01$ м. По [3, табл. 9.23] , .

Длина лобовой части определяется по формуле (76).

(76)

Средняя длина витка рассчитывается по формуле (77).

(77)

Тогда:

Длина вылета лобовых частей обмотки определяется по формуле (78).

(78)

Относительное значение можно рассчитать по формуле (79).

(79)

Активное сопротивление фазы медной обмотки ротора можно определить по формуле (80).

(80)

где:

(81)

—

(82)

(для литой алюминиевой обмотки ротора)

Тогда получим:

Приводим к числу витков обмотки статора по формуле (83).

(83)

Относительное значение можно определить по формуле (84).

(84)

Индуктивное сопротивление обмотки статора можно рассчитать по формуле (85).

(85)

где по [3, табл. 9.26 (см. рис 9.50,е)]:

(86)

где ,) = 0,888 (при

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния можно рассчитать по формуле (87).

(87)

Для — и так как скоса пазов нет, то , по [3, рис.9.51д]

(88)

Тогда коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния рассчитывается по формуле (89).

(89)

Тогда индуктивное сопротивление статора:

Относительное значение рассчитывается по формуле (90).

(90)

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора можно рассчитать по формуле (91).

(91)

где по [3, табл.9.27 и рис. 9.52а]:

(92)

где , а при расчете номинального режима .

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния рассчитывается по формуле (93).

(93)

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки короткозамкнутого ротора можно определить по формуле (94).

(94)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

(95)

Так как пазы закрытые

$$\frac{\dots}{\dots}$$

Тогда:

Приводим к числу витков статора по формуле (96).

(96)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

Относительное значение рассчитывается по формуле (97).

(97)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

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 рассчитываются по формуле (98).

—

где — удельные потери при индукции 1 Тл и частоте перемангничивания 50 Гц (по [3, табл.9.28] Вт/кг); и — коэффициенты, учитывающие влияние на потери в стали неравномерности распределения потока по сечениям участков магнитопровода и технологических факторов (для машин небольшой мощности можно принять и);

Масса стали ярма и зубцов статора и рассчитываются (99) и (100).

(99)

(100)

где — удельная масса стали; в расчетах принимают

Тогда:

—

Поверхностные потери в роторе рассчитываются по формуле (101)

(101)

где — удельные поверхностные в роторе:

(102)

—

где — коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности головок зубцов ротора на удельные потери (примем).

(103)

По [3, рис 9.53]

Тогда:

(104)

—

—

Пульсационные потери в зубцах ротора: (105)

где ΔB – амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора: (106)

m – масса стали зубцов ротора: (107)

Тогда:

Сумма добавочных потерь в стали определяется по формуле (108). (108)

Полные потери в стали определяются по формуле (109). (109)

Механические потери можно вычислить по формуле (110). (110)

Холостой ход двигателя: (112)

где I_0 – активная составляющая тока холостого хода: (113)

– электрические потери в статоре при холостом ходу рассчитываются по формуле (114).

(114)

Тогда:

$$\frac{\dots}{\dots}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе, рассчитывается по формуле (115).

(115)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

3.8 Расчет рабочих характеристик.

Рабочими характеристиками асинхронных двигателей называют зависимости \dots . Часто к ним относят также зависимости \dots и \dots .

Параметры рабочей точки:

(116)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

(117)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

(118)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода определяется по формуле (119).

(119)

$$\frac{\dots}{\dots}$$

(120)

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения:

Рассчитываем рабочие характеристики для скольжений $s=0,005; 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,03$, принимая предварительно, что .

Таблица 3.3 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

| п/ п | Расчетная формула | Разм ерно сть | Скольжение, s | | | | | | |
|---------|----------------------|---------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 0,01 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,048 | 0,056 | 0,06 |
| 1 | | Ом | 150,256 | 75,128 | 50,085 | 37,564 | 31,303 | 26,736 | 25,043 |
| 2 | | Ом | 151,806 | 76,678 | 51,635 | 39,114 | 32,853 | 28,286 | 26,592 |
| 3 | | Ом | 5,364 | 5,364 | 5,364 | 5,364 | 5,364 | 5,364 | 5,364 |
| 4 | | Ом | 151,9 | 76,865 | 51,913 | 39,48 | 33,288 | 28,79 | 27,128 |
| 5 | | А | 1,448 | 2,862 | 4,238 | 5,572 | 6,609 | 7,62 | 8,11 |
| 6 | | - | 0,999 | 0,998 | 0,995 | 0,991 | 0,987 | 0,982 | 0,98 |
| 7 | | - | 0,035 | 0,07 | 0,103 | 0,136 | 0,161 | 0,186 | 0,198 |
| 8 | | А | 1,775 | 3,183 | 4,543 | 5,849 | 6,851 | 7,836 | 8,278 |
| 9 | | А | 4,953 | 5,102 | 5,34 | 5,659 | 5,967 | 6,326 | 6,505 |
| 10 | | | 5,262 | 6,013 | 7,011 | 8,138 | 9,085 | 10,07 | 10,528 |
| 11 | | А | 1,526 | 3,013 | 4,465 | 5,871 | 6,964 | 8,052 | 8,545 |
| 12 | | кВт | 1,172 | 2,101 | 2,998 | 3,86 | 4,521 | 5,172 | 5,463 |
| 13 | | кВт | 0,122 | 0,16 | 0,217 | 0,292 | 0,364 | 0,447 | 0,489 |
| 14 | | кВт | 0,0003 | 0,0015 | 0,003 | 0,005 | 0,008 | 0,011 | 0,012 |
| 15 | | кВт | 0,005 | 0,011 | 0,015 | 0,019 | 0,023 | 0,026 | 0,027 |
| 16 | | кВт | 0,265 | 0,308 | 0,372 | 0,454 | 0,531 | 0,621 | 0,665 |
| 17 | | кВт | 0,907 | 1,793 | 2,627 | 3,407 | 3,99 | 4,551 | 4,798 |
| 18 | | - | 0,774 | 0,853 | 0,876 | 0,882 | 0,883 | 0,88 | 0,878 |

| | | | | | | | | | |
|----|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 19 | | - | 0,337 | 0,529 | 0,648 | 0,719 | 0,754 | 0,778 | 0,786 |
|----|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

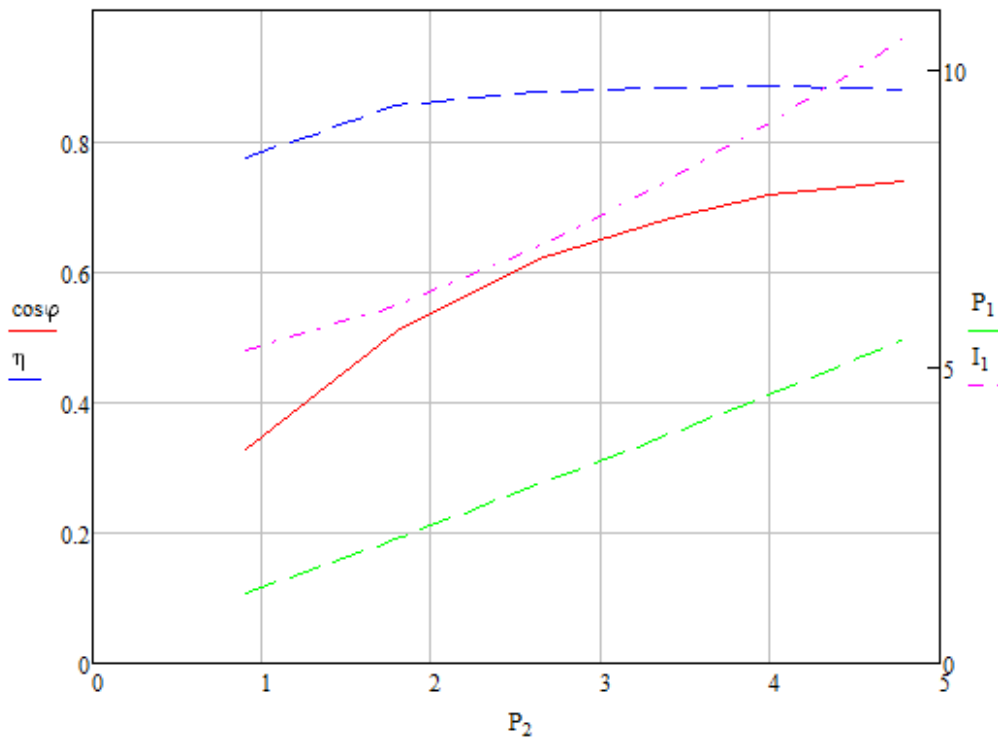


Рисунок 3.5 – Рабочие характеристики спроектированного двигателя.

3.9 Расчет пусковых характеристик.

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

Расчет проводится в целях определения токов в пусковых режимах для дальнейшего учета влияния насыщения на пусковые характеристики двигателя. Подробный расчет приведен для $s=1$. Данные расчета остальных точек сведены в таблицу 6.

Активное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока (; , ,).

$$-$$

(121)

По [3, рис.9.57] .

Так как $0,0035 < h_r < 0,05$, то глубина проникновения тока рассчитывается по формуле (122).

(122)

(123)

Площадь сечения с учетом вытеснения тока рассчитывается по формуле (124).

(124)

(125)

Коэффициент увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока можно рассчитать по формуле (126).

(126)

Приведенное сопротивление фазы ротора с учетом вытеснения тока рассчитывается по формуле (127).

(127)

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

По [3, рис.9.58] для _____ находим _____ .
(128)

где _____
(129)

Тогда:

Приведенное индуктивное сопротивление фазы ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока можно вычислить по формуле (130).
(130)

Пусковые параметры:
(131)

(132)

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

(133)

(134)

(135)

(136)

Критическое скольжение (предварительно) определим по формуле (137).

(137)

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | <i>130302.2019.175.ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 39 |

Таблица 3.4 – Пусковые характеристики без учета насыщения.

| п/п | Расчетная формула | Размерность | Скольжение, s | | | | | |
|-----|-------------------|-------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 |
| 1 | — | | 1,647 | 1,473 | 1,164 | 1,041 | 0,736 | 0,521 |
| 2 | | | 0,5 | 0,3 | 0,14 | 0,11 | 0,09 | 0,07 |
| 3 | | мм | 0,017 | 0,02 | 0,023 | 0,023 | 0,024 | 0,024 |
| 4 | | | 1,238 | 1,131 | 1,054 | 1,041 | 1,033 | 1,024 |
| 5 | — | | 1,192 | 1,106 | 1,044 | 1,033 | 1,026 | 1,02 |
| 6 | | Ом | 1,613 | 1,496 | 1,412 | 1,398 | 1,389 | 1,38 |
| 7 | | | 0,87 | 0,9 | 0,94 | 0,95 | 0,97 | 0,99 |
| 8 | | | 0,132 | 0,101 | 0,061 | 0,051 | 0,03 | 0,01 |
| 9 | | | 0,962 | 0,97 | 0,982 | 0,985 | 0,991 | 0,997 |
| 10 | | Ом | 2,561 | 2,584 | 2,616 | 2,623 | 2,639 | 2,655 |
| 11 | | Ом | 3,151 | 3,419 | 4,412 | 5,111 | 8,703 | 15,841 |
| 12 | | Ом | 4,952 | 4,977 | 5,009 | 5,018 | 5,034 | 5,05 |
| 13 | — | А | 37,482 | 36,438 | 32,956 | 30,718 | 21,883 | 13,232 |
| 14 | — — — | А | 39,272 | 38,202 | 34,6 | 32,29 | 23,164 | 14,337 |

3.10 Расчет пусковых характеристик с учетом влияния вытеснения тока и насыщения от полей рассеивания.

Расчет проводим для точек характеристик, соответствующих $s=1; 0,8; 0,5; 0,4; 0,2; 0,1$, при этом используем значения токов и сопротивлений для тех же скольжений с учетом влияния вытеснения тока.

Данные расчета сведены в таблицу 7. Подробный расчет приведен для $s=1$.

Индуктивные сопротивления обмоток.

Принимаем

:

(138)

$$\frac{\Phi_{\text{рассеяния}}}{\Phi_{\text{машины}}} = \frac{F_{\text{рассеяния}}}{F_{\text{машины}}} \quad (139)$$

Фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре рассчитывается по формуле (140).

$$\Phi_{\text{ф}} = \frac{F_{\text{рассеяния}}}{k_{\text{с}}} \quad (140)$$

По [3, рис.9.61] и $k_{\text{с}}$ находим $\Phi_{\text{ф}}$ – отношение потока рассеяния при насыщении к потоку рассеяния ненасыщенной машины.

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

$$k_{\text{с}} = \frac{F_{\text{рассеяния}}}{\Phi_{\text{ф}}} \quad (141)$$

Уменьшение коэффициента магнитной проводимости рассеяния, вызванное насыщением от полей рассеяния рассчитывается по формуле (142).

$$k_{\text{с}} = \frac{F_{\text{рассеяния}}}{\Phi_{\text{ф}}} \quad (142)$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния при насыщении для статора можно рассчитать по формуле (143)

$$k_{\text{с}} = \frac{F_{\text{рассеяния}}}{\Phi_{\text{ф}}} \quad (143)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора с учетом насыщения:

(144)

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора с учетом влияния насыщения:

(145)

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора с учетом влияния насыщения и вытеснения тока определяется по формуле (146).

(146)

где

(147)

тогда:

(148)

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния ротора с учетом влияния насыщения можно вычислить по формуле (149).

(149)

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения рассчитывается по формуле (150).

(150)

(151)

Расчет токов и моментов:

(152)

(153)

(154)

(155)

Кратность пускового тока определяется по формуле (156).

(156)

Кратность пускового момента определяются по формуле (157).

(157)

Полученный в результате расчета коэффициент насыщения:

(158)

Отличается от принятого менее чем на 12%.

Критическое скольжение:

(159)

Полученные в результате расчета двигателя параметры примерно совпадают с паспортными данным, что говорит о достоверности расчета.

Рассчитанные характеристики построены на рисунке 3.5.

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | <i>130302.2019.175.ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | 44 |

Таблица 3.5 – Пусковые характеристики с учетом насыщения

| п/п | Расчетная формула | Размерность | Скольжение, s | | | | | |
|-----|--------------------------------|-------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 1 | 0,8 | 0,5 | 0,4 | 0,2 | 0,1 |
| 1 | | | 1,35 | 1,3 | 1,2 | 1,15 | 1,1 | 1,05 |
| 2 | $\frac{1}{1 + 0,0001 \cdot s}$ | А | 2592 | 2428 | 2031 | 1816 | 1246 | 736 |
| 3 | $\frac{1}{1 + 0,0001 \cdot s}$ | Тл | 4,293 | 4,021 | 3,363 | 3 | 2,063 | 1,219 |
| 4 | | | 0,54 | 0,57 | 0,67 | 0,73 | 0,86 | 0,95 |
| 5 | | мм | 4,099 | 3,832 | 2,941 | 2,406 | 1,248 | 1,248 |
| 6 | | | 0,911 | 0,919 | 0,951 | 0,973 | 1,037 | 1,037 |
| 7 | | | 1,003 | 1,058 | 1,244 | 1,355 | 1,597 | 1,597 |
| 8 | | Ом | 1,559 | 1,602 | 1,747 | 1,837 | 2,041 | 2,194 |
| 9 | | | 1,028 | 1,029 | 1,032 | 1,033 | 1,037 | 1,04 |
| 10 | | мм | 6,314 | 5,9 | 4,529 | 3,706 | 1,922 | 0,686 |
| 11 | | | 2,166 | 2,2 | 2,256 | 2,279 | 2,35 | 2,453 |
| 12 | | | 0,378 | 0,399 | 0,469 | 0,511 | 0,602 | 0,665 |
| 13 | | Ом | 2,101 | 2,144 | 2,242 | 2,292 | 2,418 | 2,546 |
| 14 | | Ом | 3,13 | 3,395 | 4,385 | 5,082 | 8,672 | 15,819 |
| 15 | | Ом | 3,72 | 3,808 | 4,06 | 4,206 | 4,548 | 4,842 |
| 16 | $\frac{1}{1 + 0,0001 \cdot s}$ | А | 45,256 | 43,121 | 36,815 | 33,35 | 22,467 | 13,3 |
| 17 | $\frac{1}{1 + 0,0001 \cdot s}$ | А | 47,042 | 44,867 | 38,412 | 34,859 | 23,694 | 14,384 |
| 18 | | | 1,2 | 1,174 | 1,1 | 1,08 | 1,023 | 1 |
| 19 | | | 5,15 | 4,916 | 4,2 | 3,819 | 2,596 | 1,576 |
| 20 | $\frac{1}{1 + 0,0001 \cdot s}$ | | 2,1 | 2,226 | 2,45 | 2,488 | 2,243 | 1,562 |

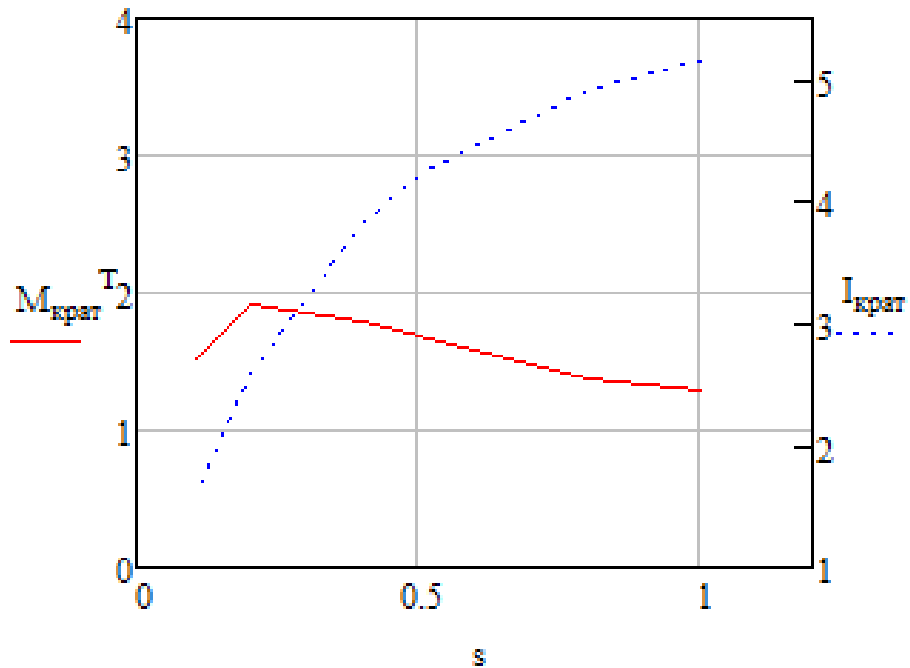


Рисунок 3.6 – Пусковые характеристики рассчитанного двигателя в относительных единицах.

В разделе электромагнитный расчет с помощью методики [3] рассчитаны основные параметры асинхронного двигателя и также построены его характеристики.

Все показатели находятся в пределах нормы.

Аnsys Maxwell включает в себя следующие программные модули: ansys maxwell включает в себя следующие программные модули:

- rmxprt (проектирование и оптимизация вращающихся электрических машин)

- maxwell 2d (расчет магнитных полей переменного / постоянного тока, электростатика, расчет вихрей и тонов кожи-эффект, переходное, параметрическое моделирование и оптимизация);

- maxwell 3d (электрические и электростатические трехмерные поля, магнитостатические линейные и нелинейные поля, гармонические стационарные трехмерные поля, переходные процессы трехмерных магнитных полей).

В RМхprt может рассчитать производительность машины, принять первоначальные решения о размерах на основе уже готовых шаблонов.

4.3 Моделирование в программе Ansys Electronics Desktop – Maxwell

Для проверки расчетов асинхронного двигателя по методике [3] была выбрана программа Maxwell. Первоначальная проверка произведена в режиме RМхprt, расчетная модель была построена через скалярные параметры, которые можно легко менять.

Скалярные параметры, определяющие расчетную модель:

диаметр расточки статора 136мм

длина сердечника 12,1 мм

число пазов статора 36 шт;

высота паза 15,6мм

ширина зубца 6 мм

однослойная обмотка;

параллельных ветви $a = 1$

диаметр обмоточного провода мм^2

наружный диаметр ротора 135,2мм

длина ротора 12,1 мм

На рисунках 4.1 и 4.2 представлены модель, построенная по заданным параметрам и схема обмотки.

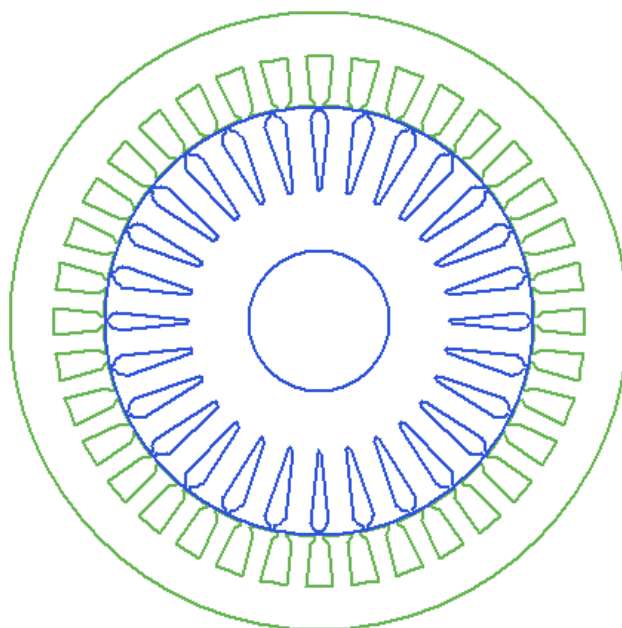


Рисунок 4.1 – Модель в RMxprt

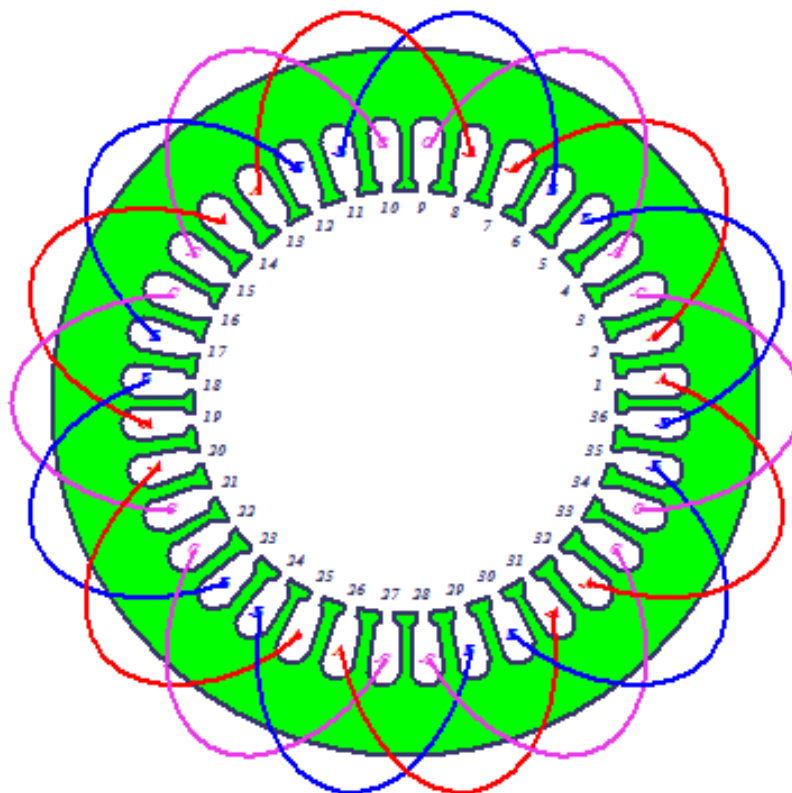


Рисунок 4.2 – Схема обмотки в RMxprt

Было произведено моделирование машины по заданным параметрам:

мощность 4кВт;

напряжение 380В;

частота вращения 944 об/мин;

рабочая температура 75°C.

Полученные результаты сведены в таблицу 4.1 для удобства сравнения контрольных точек с результатами, полученными при электромагнитном расчете.

| | | | | | | |
|------------|-------------|-----------------|----------------|-------------|---------------------------|-------------|
| | | | | | <i>130302.2019.175.ПЗ</i> | <i>Лист</i> |
| | | | | | | 50 |
| <i>Изм</i> | <i>Лист</i> | <i>№ докум.</i> | <i>Подпись</i> | <i>Дата</i> | | |

Таблица 4.1 – Сводная таблица основных параметров двигателя.

| Наименование | Расчет | Maxwell |
|--------------------|--------|---------|
| r_a | 1,471 | 1,388 |
| x_a | 2,286 | 1,622 |
| r_r | 1,353 | 1,071 |
| x_r | 2,663 | 4,473 |
| x_{12} | 42,6 | 35,4 |
| I_l | 9,12 | 9,80 |
| I_μ | 4,9 | 5,6 |
| M_H | 38,27 | 39,75 |
| КПД | 88,3% | 85,5% |
| $\cos\varphi$ | 0,754 | 0,710 |
| s | 0,048 | 0,039 |
| n_H | 952 | 960 |
| I_{xx} | 4,91 | 5,98 |
| $\cos\varphi_{xx}$ | 0,075 | 0,062 |
| $s_{кр}$ | 0,37 | 0,28 |

| Наименование | Расчет | Maxwell |
|--------------|--------|---------|
| $M_{кр}$ | 136 | 103,9 |
| M_H | 59,2 | 70,2 |
| I_H | 39,2 | 47,8 |
| B_{z1} | 1,81 | 1,54 |
| B_{z2} | 1,8 | 1,53 |
| B_a | 1,5 | 1,42 |
| B_j | 1,11 | 1,05 |
| B_δ | 0,87 | 0,76 |

Расчеты приблизительно совпадают, что говорит об актуальности использования Maxwell.

Следующим этапом переведем модель в Maxwell 2D для расчета переменного магнитного поля, она показана на рисунке 4.3.

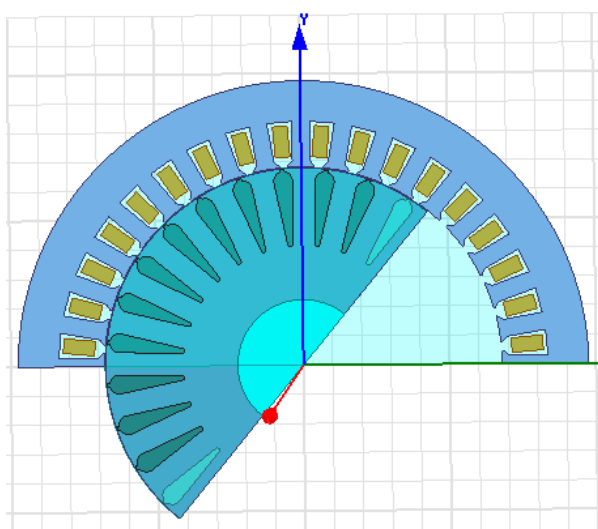


Рисунок 4.3 – Модель генератора в Maxwell 2D.

Источником электромагнитного поля в расчетной области является трехфазная обмотка в пазах статора. Заключительным этапом подготовки модели было определение шага расчета. Были заданы следующие параметры анализа: шаг расчета – 4 с, окончание счета – 4 с.

Ниже на рисунках приведенных зависимости от времени, полученные при моделировании. На рисунке 4.4 изображено распределение вектора магнитной индукции по машине.

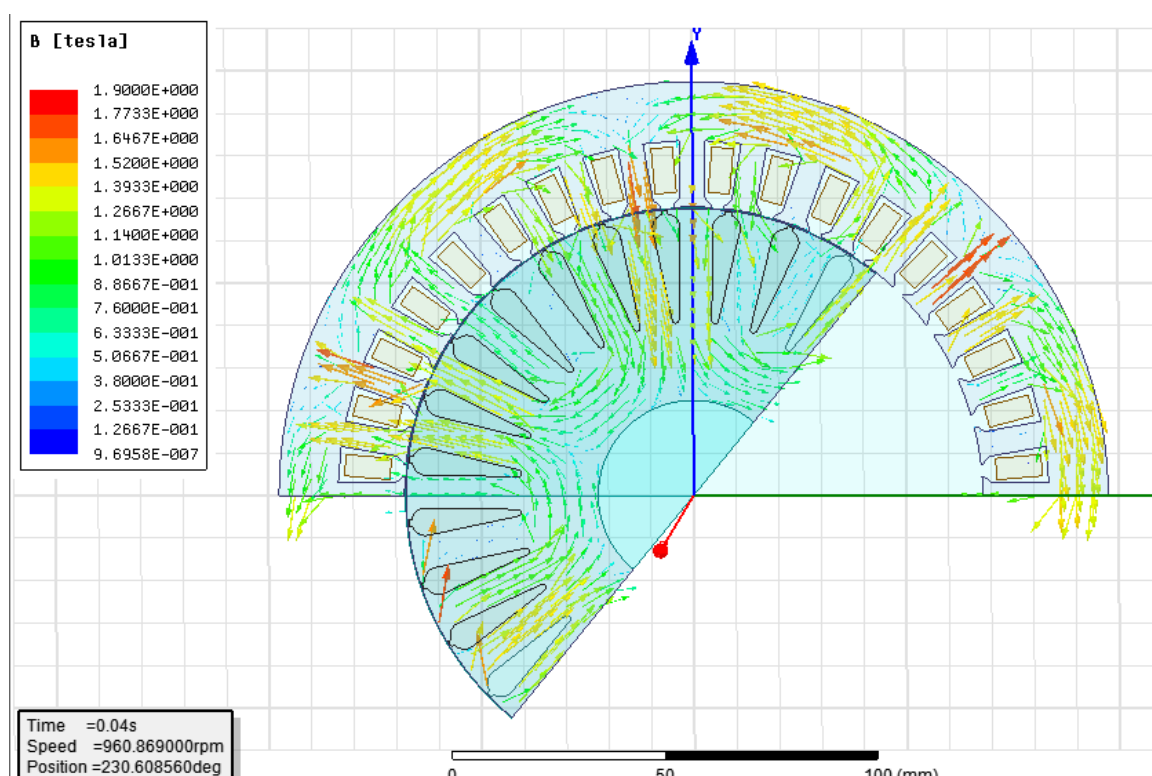


Рисунок 4.4 – Характер распределения вектора магнитной индукции.

На рисунках 4.5 – 4.6 можно увидеть подробную картину распределения магнитной индукции при $t = 0,04$.

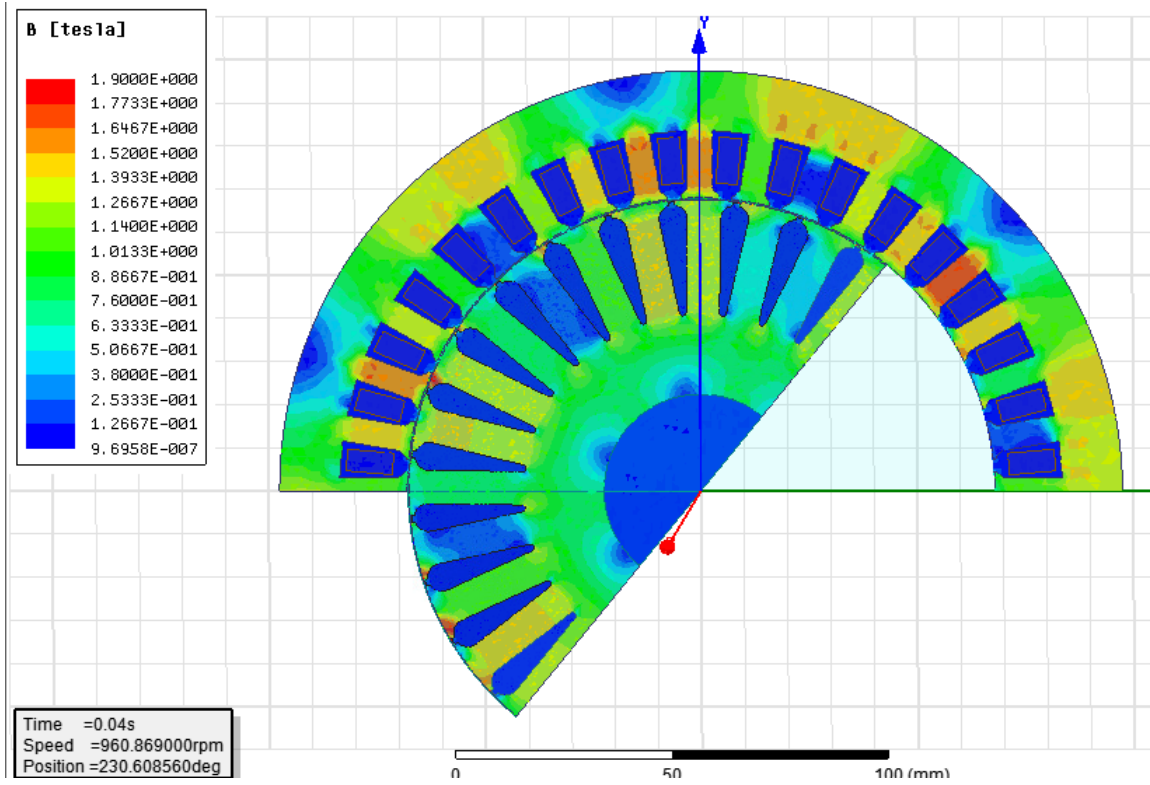


Рисунок 4.5 – Общий вид магнитного поля.

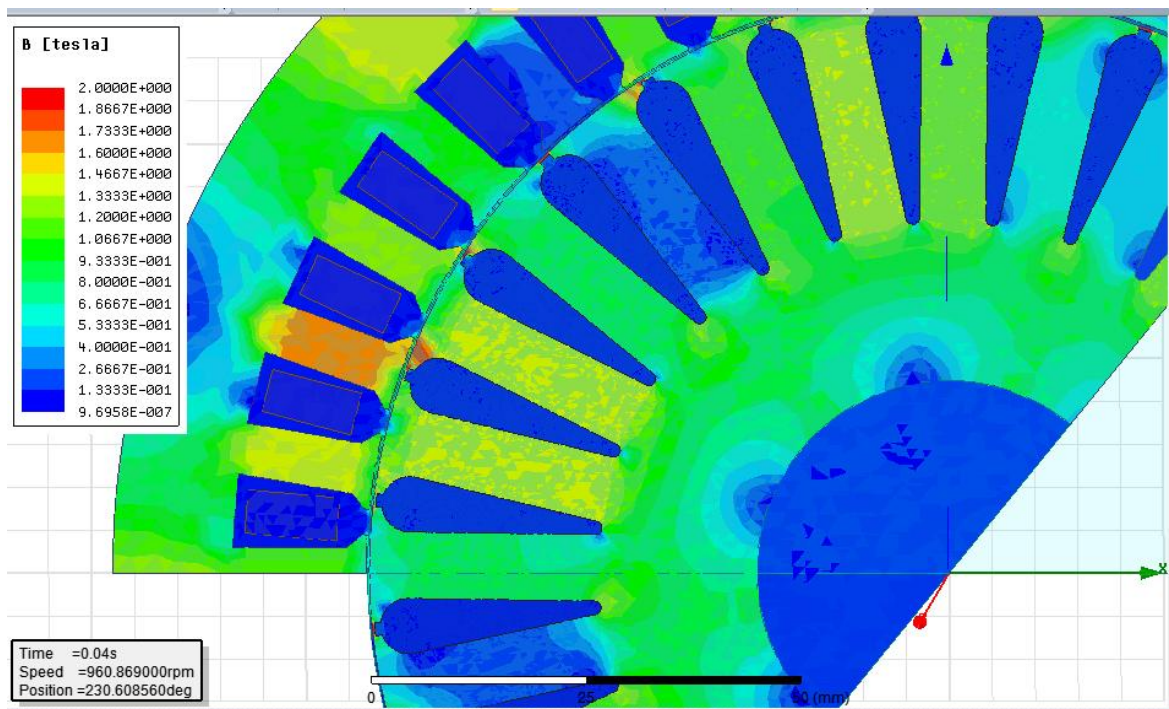


Рисунок 4.6 – Картина магнитной индукции в машине.

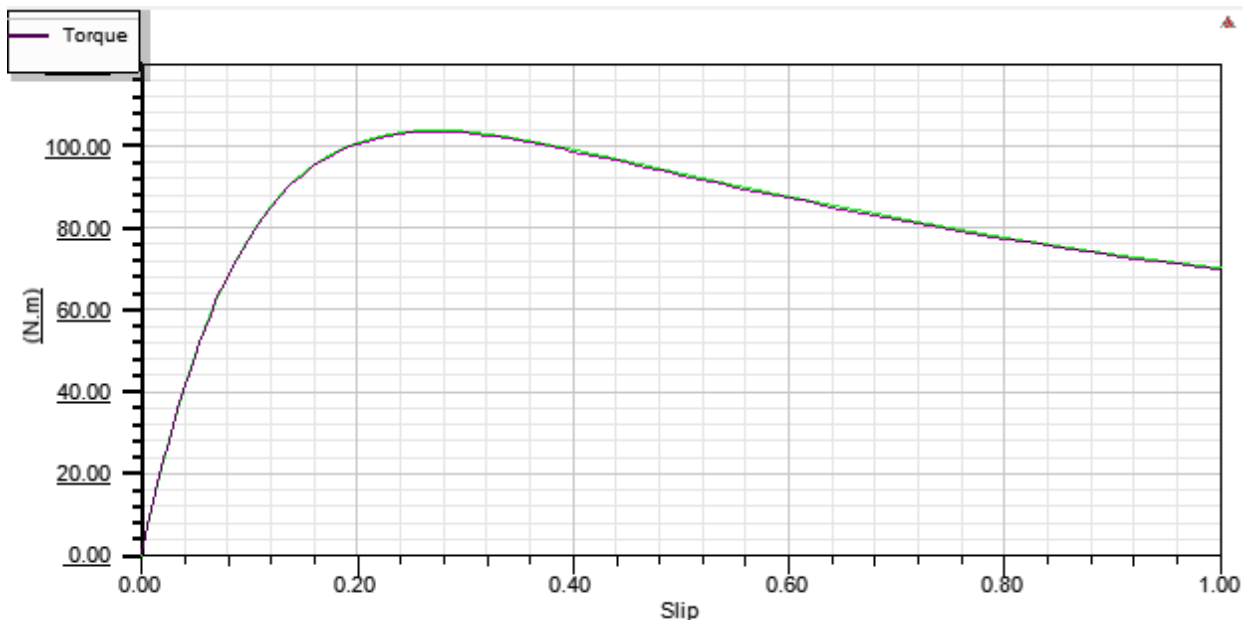


Рисунок 4.7 – Механическая характеристика АД в Maxwell.

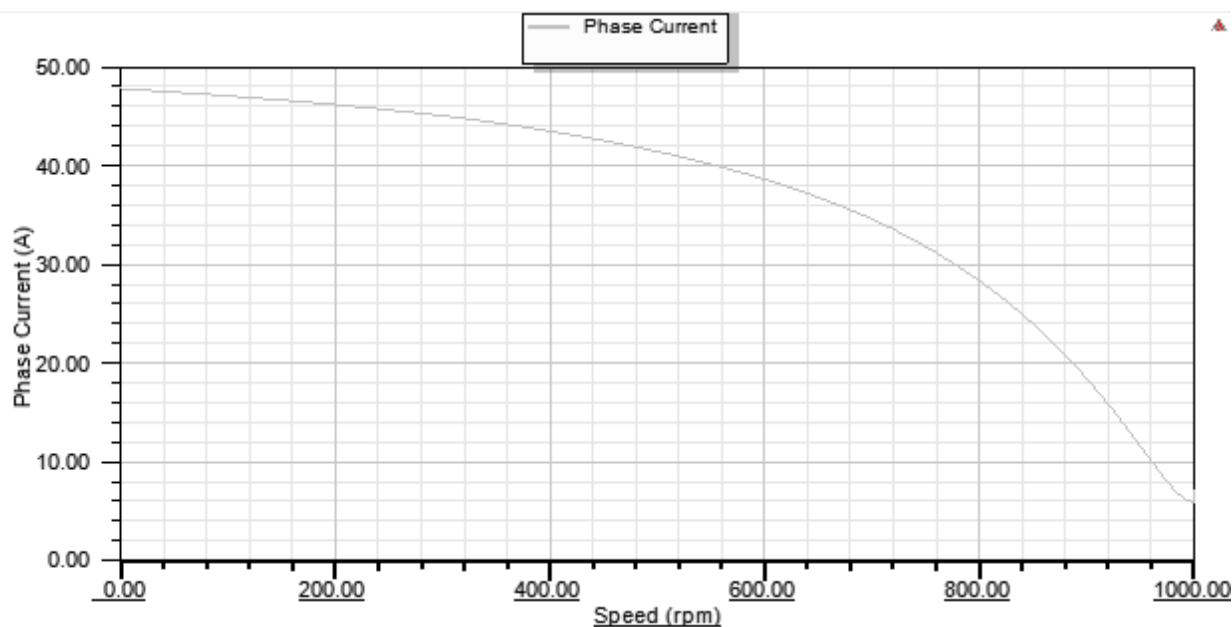


Рисунок 4.8 – Скоростная характеристика АД в Maxwell.

Результаты моделирования в программе Ansys Electronics Desktop – Maxwell приблизительно совпадают с электромагнитным расчётом, а так же представили более точную картину электромагнитных процессов.

5 МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В JIGREIN

Jigrein – это программа для математического моделирования поведения сложных технических систем. [8], [9].

Моделирование режимов работы асинхронного двигателя.

Будем использовать известную обобщенную асинхронную машину, которая показана на рисунке 5.1. Математическое описание данной машины известно и основано на четырёх законах.

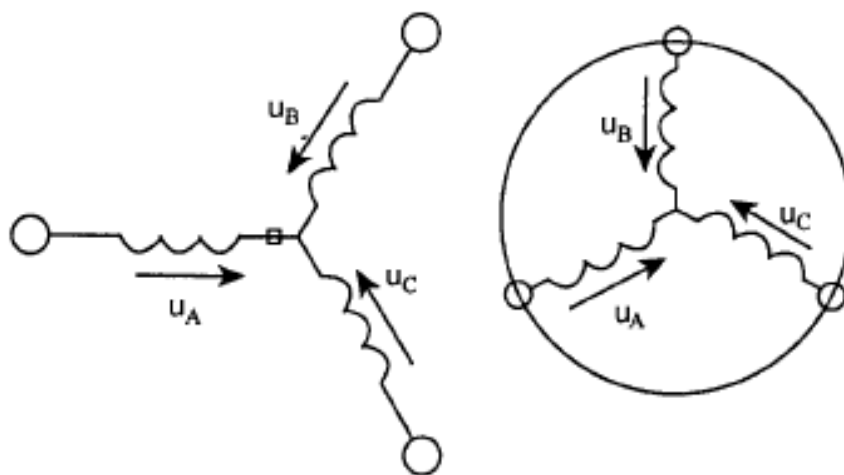


Рисунок 5.1 – Обобщенная асинхронная машина.

По закону Кирхгофа.

Уравнения равновесия напряжения для статора:

—

—

—

(160)

Уравнения равновесия напряжения для ротора:

—

—

(161)

По закону Ампера,
Для потокосцепления статора:

(162)

Для потокосцепления ротора:

(163)

По второму закону Ньютона запишем закон равновесия моментов на валу
машины:

(164)

По правилу левой руки связываются векторные величины момента,
потокосцепления и ток:

(165)

При моделировании процессов используем уже готовую модель в Jigrein, в
которую вводим параметры, полученные в электромагнитном расчете. На рисунке
5.2 представлена эта модель.

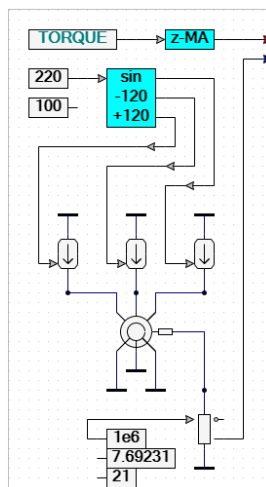


Рисунок 5.2 – Модель асинхронного двигателя в Jigrein.

Следующим шагом является моделирование режим работы на низких нагрузках. На рисунке 5.3 представлена механическая характеристика на холостом ходу.

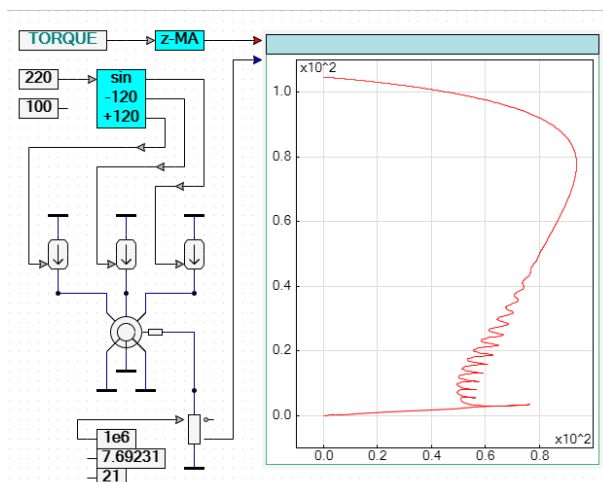


Рисунок 5.3 – Механическая характеристика на холостом ходу.

Снимем семейство характеристик при фиксированном значении момента.

Таблица 5.1 – Зависимость тока статора от напряжения.

| | M = 0,325 | M = 0,125 | M = 0 |
|-----|-----------|-----------|-------|
| U | I | I | I |
| 250 | 5,65 | 5,39 | 5,26 |
| 220 | 5,22 | 4,7 | 4,64 |
| 170 | 4,74 | 3,75 | 3,61 |
| 155 | 4,71 | 3,51 | 3,29 |
| 145 | 4,71 | 3,33 | 3,05 |
| 130 | 4,92 | 3,14 | 2,77 |
| 110 | 5,4 | 2,91 | 2,34 |
| 90 | 6,42 | 2,83 | 1,88 |
| 80 | 7,27 | 2,93 | 1,91 |
| 70 | 8,7 | 3,15 | 2,11 |

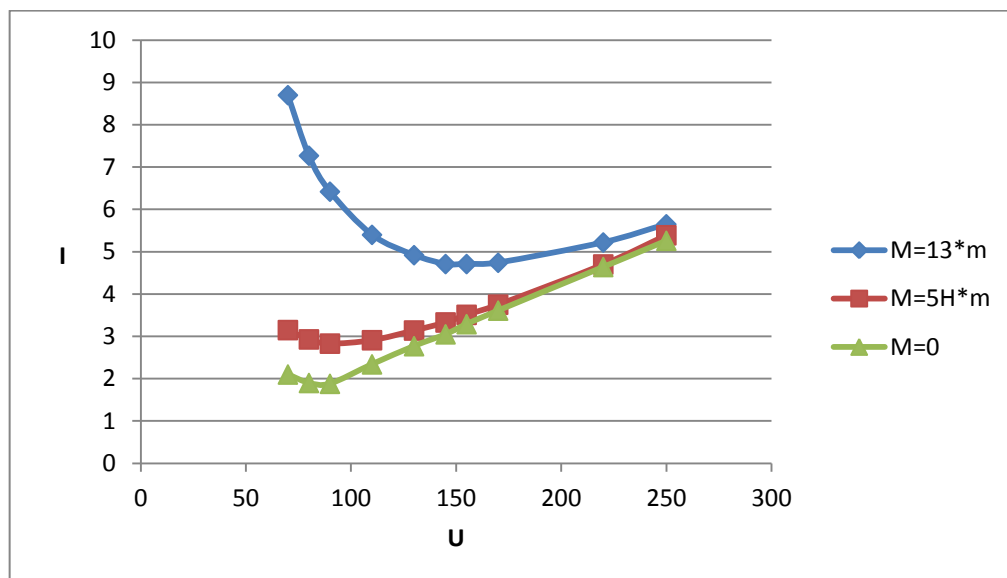


Рисунок 5.4 – Семейство зависимостей тока от напряжения.

На характеристиках мы видим четко тенденцию снижения тока статора при малых нагрузках и холостом ходу при снижении питающего напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе выпускной квалификационной работы было проведено исследование режимов работы асинхронного двигателя на холостом ходу и в режиме малых нагрузок.

В ходе работы проведено экспериментальные исследования работы АД с короткозамкнутым ротором. После был произведен электромагнитный расчет по методике Копылова [3], для определения внутренних параметров двигателя.

Также был проведен поверочный расчет асинхронного двигателя в Maxwell, с целью проверки полученных данных и визуализации магнитных полей в машине.

В последней части представлено моделирование режимов работы асинхронного двигателя в Jigrein. В результате получили характеристики, приблизительно совпадающие с экспериментом.

При разработке квалификационной работы были использованы следующие программные средства: *Компас, Microsoft Office, Jigrein, Ansys Electronics Desktop – Maxwell.*

| | | | | | | | | | |
|-----|------|----------|---------|------|--------------------|--|--|--|------|
| | | | | | | | | | Лист |
| | | | | | | | | | 59 |
| Изм | Лист | № докум. | Подпись | Дата | 130302.2019.175.ПЗ | | | | |

