

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

**«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

Институт «Политехнический», факультет «Энергетический»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**РАБОТА ПРОВЕРЕНА**

Рецензент, доцент кафедры, к.т.н

\_\_\_\_\_/ Д.А. Сычев/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ**

Заведующий кафедрой, к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_/А.Н. Шишков/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВОЗАЩИЩЕННОЙ АСИНХРОННОЙ  
МАШИНЫ, РАБОТАЮЩЕЙ В СОСТАВЕ РЕГУЛИРУЕМОГО  
ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ  
РАБОТЕ**

**ЮУрГУ-13.04.02.2019.157 ПЗ ВКР**

Руководитель проекта:

доцент, к.т.н.

\_\_\_\_\_/А.Н. Горожанкин/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Автор проекта

студент группы П-286

\_\_\_\_\_/В.А. Ершов/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

Нормоконтролер

доцент, к.т.н

\_\_\_\_\_/А.Е. Бычков/

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2019 г.

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ОБЗОР ДВИГАТЕЛЯ И СРАВНЕНИЕ ЕГО С АНАЛОГАМИ .....	7
2 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ .....	8
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ПРОГРАММЕ ANSYS MAXWELL.....	53
4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В MATLAB .....	59
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	61
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	62

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		4

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день важнейшим полезным ископаемым для человека является нефть. Жизнь современного человека немислима без этого ценного сырья.

Когда мы слышим слово «нефть», то как правило возникают ассоциации с бензином, другим топливом, смазочными материалами. И в этом конечно же ее главенствующая роль. Но применение нефти не ограничивается заправочной станцией. Нефть для каждого человека значит намного больше.

Строительные материалы, лаки, краска, многие напольные покрытия содержат нефтяные масла. Производные нефти входят в состав одежды. Нефтепродукты так же являются составной частью пластмасс, из которых изготавливаются выключатели, телефоны и другие предметы обихода.

Если представить себе, что нефть вдруг перестала существовать, то практически все так любимые нами предметы, в состав которых входит пластмасса и резина, станут для большинства жителей Земли просто непомерно дорогими.

Без нефти, а точнее без продуктов ее переработки, не может не только развиваться ни одна отрасль народного хозяйства, но и существовать. Из нефти получают все возможные виды топлива – котельное, бензин, керосин, дизельное, газотурбинное топлива, смазочные и специальные масла, технический углерод, пластичные смазки, парафин, битумы, нефтяные коксы. Кроме того, нефть является сырьем для получения ряда продуктов органического синтеза.

Энергетика, оборона страны, транспорт, сельское хозяйство, бытовые нужды населения, экономика страны находятся в прямой зависимости от нефти. И в последнее время ее роль все возрастает – нефть и продукты ее переработки используют для производства искусственной кожи, съедобного жира, парфюмерии, суррогата столового масла и технического, моющих средств и других продуктов, число которых превышает 700 наименований.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		5

Для России нефть играет особо важную роль – на ее долю приходится основная статья доходов государства. Поэтому правительство Российской Федерации уделяет повышенное внимание развитию нефтегазовой отрасли. Нефтяная промышленность нашей страны переживает сегодня не лучшие времена. Но несмотря на все проблемы она была и остается важнейшей для России отраслью.

Исходя из всего выше сказанного следует, что развитие нефтяной промышленности для России является важнейшим моментом. АО «Транснефть» является крупной компанией, занимающейся транспортировкой нефти. В нынешнее время компания активно обновляет оборудование, которое уже многие десятилетия эксплуатируется и требует замены на новые агрегаты. Поэтому важной задачей является разработка новых агрегатов. Именно этой цели посвящена моя работа: разработке электродвигателя, который будет производиться предприятием «Русские электрические двигатели» и в ближайшие годы начнет эксплуатироваться компанией АО «Транснефть».

Объект исследования – асинхронный электропривод, предназначенный для работы в составе магистрального насосного агрегата.

Целью диссертационной работы является разработка взрывозащищенного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, его моделирование, разработка системы управления двигателем.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

- обзор и сравнение с другими двигателями, которые производят компании-конкуренты;
- электромагнитный расчет электродвигателя;
- создание компьютерной модели с помощью программы *AnsysMaxwell*;
- моделирование модели системы ПЧ-АД в программе *MATLAB*;
- получение решения и его анализ.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		6

## 1 ОБЗОР ДВИГАТЕЛЯ И СРАВНЕНИЕ ЕГО С АНАЛОГАМИ

Разработанный мною асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором состоит из ротора и статора, разделенных воздушным зазором. Минимальный воздушный зазор выбирается из технологических соображений.

Ротор расположен внутри и является короткозамкнутым. Ротор имеет 46 пазов. В пазы ротора вставлены медные стержни. С торцов расположены медные замыкающие кольца.

Статор шихтованный, выполнен из электротехнической стали 2414. Имеет 60 пазов прямоугольной формы. В пазах уложена двухслойная обмотка.

Двигатель является взрывозащищенным, тип взрывозащиты Exd. Это означает, что у него имеется взрывонепроницаемая оболочка.

В двигателе установлены подшипники скольжения.

Далее представлю паспортные данные электродвигателя производства «Электротяжмаш» для сравнения с параметрами спроектированного мною двигателя.

- Мощность – 3150 кВт;
- Напряжение питания - 10 кВ;
- Синхронная скорость вращения – 3000 об/мин.;
- КПД – 96,7%;
- Тип взрывозащиты - 1 Exd || В Т4Gb.

Из выше представленных данных можно сделать вывод, что спроектированный мною двигатель обладает большим КПД по сравнению с двигателем, производящимся компанией «Электротяжмаш». Считаю это весомым преимуществом для себя, так как при длительной работе двигателя такой мощности будем сэкономлено большое количество электроэнергии.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<i>7</i>

## 2 ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ РАСЧЕТ

Задача, решаемая мною, состояла в следующем: по готовому штампу необходимо спроектировать асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Иными словами: геометрия листа ротора и листа статора уже определены. И при проектировании считаются известными величинами.

Мною было получено следующее техническое задание:

1. Тип двигателя – асинхронный с короткозамкнутым ротором;
2. Мощность – 3150 кВт;
3. Напряжение питания – 10 кВ;
4. Частота питания – 50 Гц;
5. Синхронная скорость вращения – 3000 об/мин;
6. Режимы работы электродвигателя по ГОСТ ИЕС 60034-1 – S1,S10;
7. КПД – не менее 97%;
8. Тип нагрузки – вентиляторная;
9. Степень защиты – по ГОСТ 14254 – IP55;
10. Тип охлаждения по ГОСТ Р МЭК 60034-6 – IC55;
11. Способ монтажа по ГОСТ 2479 – IM1001;
12. Климатическое исполнение по ГОСТ 15150 – УХЛ1;
13. Тип взрывозащиты по ГОСТ 60079-0 – 1 Exd ia || В ТЗ Gb X;
14. Тип подшипников – подшипники скольжения;
15. Предельно допустимая масса ЭД – 20000 кг;
16. Кратность пускового тока – не более 7;
17. Кратность пускового момента – не менее 0,6;
18. Кратность максимального момента – не менее 2;
19. При прямом пуске ЭД от сети время разгона ЭД под нагрузкой должно составлять не более 10 секунд при просадке напряжения до 0,75 от номинального.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		8

Наружный диаметр статора:

$$D_a = 1,2 \text{ м.} \quad (1)$$

Внутренний диаметр статора:

$$D = 0,575 \text{ м.} \quad (2)$$

Полюсное деление:

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 0,903 \text{ м.} \quad (3)$$

Расчетная мощность:

$$P' = P_2 \cdot \frac{k_e}{\eta \cdot \cos\varphi} = 3,603 \cdot 10^6 \text{ Вт.} \quad (4)$$

Синхронная угловая скорость двигателя:

$$\Omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p} = 314 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (5)$$

Расчетная длина магнитопровода:

$$l_\delta = \frac{P'}{D^2 \cdot \Omega \cdot k_B \cdot k_{об1} \cdot B_\delta \cdot A} = 0,748 \text{ м,} \quad (6)$$

где  $k_B = \frac{\pi}{2 \cdot 2 \sqrt{2}} = 1.11$ ;

$k_{об1} = 0.91$ ;

$B_\delta = 74000$ ;

$A = 0.62$ .

Расчет коэффициента  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{l_\delta}{\tau} = 0,828. \quad (7)$$

Значение  $\lambda$  находится в допустимых пределах.

Расчет количества вентиляционных каналов:

$$n_{\text{пак.р}} = \frac{l_\delta}{l_{\text{пак}}} = 10,686, \quad (8)$$

где  $l_{\text{пак}} = 0.07 \text{ м.}$  – длина элементарного пакета.

$$n_{\text{пак}} = 11. \quad (9)$$

$$n_k = n_{\text{пак}} - 1 = 10. \quad (10)$$

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		9

Длина сердечника статора без вентиляционных каналов:

$$l_{ст1} = l_{пак} \cdot n_{пак} = 0,77 \text{ м.} \quad (11)$$

Длина статора с вентиляционными каналами:

$$l_1 = l_{ст1} + n_k \cdot b_k = 0,87 \text{ м.} \quad (12)$$

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

Число пазов статора:

$$Z_1 = 60. \quad (13)$$

Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{Z_1}{2 \cdot p \cdot m} = 10. \quad (14)$$

Зубцовое деление статора:

$$t_{z1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = 0,03 \text{ м.} \quad (15)$$

Номинальный ток в фазе:

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{m \cdot \eta \cdot U_1 \cdot \cos\varphi} = 210,663 \text{ А.} \quad (16)$$

Число эффективных проводников в пазу:

$$u_{п} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1ном} \cdot Z_1} = 10,576. \quad (17)$$

Принимаем число параллельных ветвей равным 2, тогда:

$$u_{п} = 20. \quad (18)$$

Окончательное значение числа витков в фазе обмотки статора:

$$w_1 = \frac{u_{п} \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = 100. \quad (19)$$

Окончательное значение линейной нагрузки:

$$A = \frac{2 \cdot I_{1ном} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = 69970 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (20)$$

Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_1}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot f} = 0,282 \text{ Вб.} \quad (21)$$

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		10



Индукция в воздушном зазоре:

$$B_{\delta} = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_{ст1}} = 0,637 \text{ Тл.} \quad (22)$$

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

Плотность тока в обмотке статора (предварительно):

$$A \cdot J_1 = 440 \cdot 10^9. \quad (23)$$

$$J_1 = \frac{A \cdot J_1}{A} = 6,288 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}. \quad (24)$$

Площадь поперечного сечения эффективного проводника (предварительно):

$$q_{\text{эф}} = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot J_1} = 1,675 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (25)$$

Сечение эффективного проводника (окончательно):

Примем:  $n_{\text{эл}} = 4$ .

$$q_{\text{эл}} = \frac{q_{\text{эф}}}{n_{\text{эл}}} = 4,188 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (26)$$

Выберем размеры проводника:

$$b_{\text{пров}} = 4,25 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (27)$$

$$a_{\text{пров}} = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (28)$$

$$q_{\text{эл}} = 5,735 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2. \quad (29)$$

$$q_{\text{эф}} = n_{\text{эл}} \cdot q_{\text{эл}} = 2,294 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2. \quad (30)$$

Плотность тока в обмотке статора (окончательно):

$$J_1 = \frac{I_{1\text{ном}}}{a \cdot q_{\text{эл}} \cdot n_{\text{эл}}} = 4,592 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}. \quad (31)$$

Коэффициент укорочения обмотки:

$$\beta = 0,63. \quad (32)$$

Шаг обмотки:

$$y_1 = \beta \cdot \tau_{\text{п}} = 18,9. \quad (33)$$

Расчет коэффициентов:

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		11

$$k_p = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}\right)} = 0,955. \quad (34)$$

$$k_y = \sin\left(\frac{\pi \cdot \beta}{2}\right) = 0,836. \quad (35)$$

$$k_{об1} = k_p \cdot k_y = 0,799. \quad (36)$$

Расчет размеров в зубцовой зоне статора и воздушного зазора.

Так как проектирование электродвигателя осуществляется по готовому штампу, то размеры статора известны заранее:

Ширина зубца статор:

$$b_{z1} = 0,142 \text{ м.} \quad (37)$$

Высота ярма статора:

$$h_a = 2,105 \text{ м.} \quad (38)$$

Высота паза:

$$h_{п} = 0,102 \text{ м.} \quad (39)$$

Ширина паза:

$$b_{п} = 0,0158 \text{ м.} \quad (40)$$

Высота шлица:

$$h_{шст} = 0,0248 \text{ м.} \quad (41)$$

Высота клиновой части:

$$h_k = 0,0026 \text{ м.} \quad (42)$$

Площадь паза:

$$S_{паз} = (h_{п} - h_{шст} - h_k) \cdot b_{п} = 0,00179 \text{ м}^2. \quad (43)$$

Коэффициент заполнения паза:

$$K_{зап1} = \frac{q_{эф} \cdot u_{п}}{S_{паз}} = 0,389. \quad (44)$$

Расчет ротора.

Воздушный зазор:

$$\delta = 0,0065 \text{ м.} \quad (45)$$

					<i>ИОУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		12

Число пазов ротора:

$$Z_2 = 46. \quad (46)$$

Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = 0,562 \text{ м.} \quad (47)$$

Длина магнитопровода ротора:

$$l_2 = l_{\text{ст1}} = 0,77 \text{ м.} \quad (48)$$

Зубцовое деление ротора:

$$t_{Z2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = 0,038 \text{ м.} \quad (49)$$

Внутренний диаметр сердечника ротора:

Сердечник ротора выполнен с непосредственной посадкой на вал без промежуточной втулки, т.к  $D_2 < 990$  мм.

Коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания на отношение  $I_1/I_2$ :

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos \varphi = 0,912. \quad (50)$$

Коэффициент приведения токов:

$$v_i = \frac{2 \cdot w_1 \cdot m \cdot k_{\text{об1}}}{Z_2} = 10,415. \quad (51)$$

Тогда токи равны:

$$I_1 = I_{1\text{НОМ}} = 210,663 \text{ А.} \quad (52)$$

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot v_i = 2001 \text{ А.} \quad (53)$$

Площадь поперечного сечения стержня (предварительно):

$$J_2 = 6 \cdot 10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}. \quad (54)$$

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = 0,0003335 \text{ м}^2. \quad (55)$$

Геометрия паза ротора

$$b_{\text{ш}} = 0,003 \text{ м.} \quad (56)$$

$$h_{\text{ш}} = 0,0025 \text{ м.} \quad (57)$$

Высота паза ротора:

$$h_{\text{с2}} = 0,0527 \text{ м.} \quad (58)$$

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		13

Ширина паза ротора:

$$b_{п2} = 0,0083 \text{ м.} \quad (59)$$

Высота ярма ротора:

$$h_{a2} = 0,228 \text{ м.} \quad (60)$$

Высоту спинки под аксиальные вентиляционные каналы возьмем равной 0.

Площадь сечения аксиальных каналов:

$$S_{акс} = 36 \cdot \pi \cdot 0,01^2 = 0,011 \text{ м}^2. \quad (61)$$

Индукция в спинке ротора:

$$B_{a2} = \frac{\Phi}{(2 \cdot (h_{a2} - h_{акс}) \cdot l_{ст1} \cdot k_c) - S_{акс}} = 0,855 \text{ Тл.} \quad (62)$$

Площадь поперечного сечения кольца:

$$\Delta = 2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2}\right) = 0,136. \quad (63)$$

$$I_{кл} = \frac{I_2}{\Delta} = 14660 \text{ А.} \quad (64)$$

$$J_{кл} = 0,85 \cdot J_2 = 5,1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2. \quad (65)$$

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = 0,002875 \text{ м}^2. \quad (66)$$

Размеры замыкающих колец:

$$h_{кл} = 0,054 \text{ м.} \quad (67)$$

$$b_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = 0,053 \text{ м.} \quad (68)$$

$$q_{кл} = h_{кл} \cdot b_{кл} = 2,875 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (69)$$

Расчет магнитной цепи.

Марка электротехнической стали 2414.

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}. \quad (70)$$

Коэффициент воздушного зазора:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b_{п}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{п}}{\delta}} = 0,795. \quad (71)$$

					<i>ИОУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		14

$$k_{\delta 1} = \frac{t_{Z1}}{t_{Z1} - \gamma_1 \cdot \delta} = 1,207. \quad (72)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_{III}}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_{III}}{\delta}} = 0,039. \quad (73)$$

$$k_{\delta 2} = \frac{t_{Z2}}{t_{Z2} - \gamma_2 \cdot \delta} = 1,007. \quad (74)$$

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} \cdot k_{\delta 2} = 1,215. \quad (75)$$

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} = 8008 \text{ А}. \quad (76)$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны статора:

$$B_{Z1max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z1}}{b_{Z1min} \cdot k_c} = 1,392 \text{ Тл}. \quad (77)$$

$$B_{Z1min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z1}}{b_{Z1max} \cdot k_c} = 0,791 \text{ Тл}. \quad (78)$$

$$B_{Z1cp} = \frac{B_{Z1max} + B_{Z1min}}{2} = 1,092 \text{ Тл}. \quad (79)$$

$$H_{Z1max} = H_{CT}(B_{Z1max}) = 2162 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (80)$$

$$H_{Z1min} = H_{CT}(B_{Z1min}) = 637,08 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (81)$$

$$H_{Z1cp} = H_{CT}(B_{Z1cp}) = 1096 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (82)$$

$$H_{Z1} = \frac{1}{6} (H_{Z1max} + 4 \cdot H_{Z1cp} + H_{Z1min}) = 1197 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (83)$$

$$h_{Z1} = h_{II} = 0,102 \text{ м}. \quad (84)$$

$$F_{Z1} = 2 \cdot h_{Z1} \cdot H_{Z1} = 244,25 \text{ А}. \quad (85)$$

Магнитное напряжение зубцовой зоны ротора:

$$B_{Z2max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z2}}{b_{Z2min} \cdot k_c} = 1,5 \text{ Тл}. \quad (86)$$

$$B_{Z2min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{Z2}}{b_{Z2max} \cdot k_c} = 0,838 \text{ Тл}. \quad (87)$$

$$B_{Z2cp} = \frac{B_{Z2max} + B_{Z2min}}{2} = 1,169 \text{ Тл}. \quad (88)$$

$$H_{Z2max} = H_{ст}(B_{Z2max}) = 2994 \frac{A}{M}. \quad (89)$$

$$H_{Z2min} = H_{ст}(B_{Z2min}) = 690,08 \frac{A}{M}. \quad (90)$$

$$H_{Z2cp} = H_{ст}(B_{Z1cp}) = 1221 \frac{A}{M}. \quad (91)$$

$$H_{Z2} = \frac{1}{6}(H_{Z2max} + 4 \cdot H_{Z2cp} + H_{Z2min}) = 1428 \frac{A}{M}. \quad (92)$$

$$F_{Z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{Z2} = 157,679 A. \quad (93)$$

Коэффициент насыщения зубцовой зоны:

$$k_Z = 1 + \frac{F_{Z1} + F_{Z2}}{F_{\delta}} = 1,05. \quad (94)$$

Магнитное напряжение ярма статора:

Длина средней магнитной силовой линии в ярме статора:

$$h_a = \frac{D_a + D}{2} - h_{п} = 0,211 \text{ м}. \quad (95)$$

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2p} = 1,554 \text{ м}. \quad (96)$$

Индукция в ярме статора:

Радиальные вентиляционные каналы в статоре отсутствуют, поэтому:

$$h_a' = h_a = 0,211 \text{ м}. \quad (97)$$

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a' \cdot l_{ст1} \cdot k_c} = 0,897 \text{ Тл}. \quad (98)$$

Напряженность поля ярма статора

$$H_a = H_{ст}(B_a) = 757,106 \frac{A}{M}. \quad (99)$$

$$F_a = L_a \cdot H_a = 1177 A. \quad (100)$$

Магнитное напряжение ярма ротора:

Длина силовых линий в ярме:

$$L_J = \pi \cdot \frac{(D_J + 2 \cdot h_{акс} + (h_{a2} - h_{акс}))}{2p} = 0,893 \text{ м}. \quad (101)$$

Индукция в ярме ротора:

					<i>ИОУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		16

$$B_{a2} = \frac{\Phi}{(2 \cdot (h_{a2} - h_{акс}) \cdot l_{ст1} \cdot k_c) - S_{акс}} = 0,855 \text{ Тл.} \quad (102)$$

$$H_J = H_{ст}(B_{a2}) = 709,908 \frac{\text{А}}{\text{м}}. \quad (103)$$

$$F_J = L_J H_J = 633,724 \text{ А.} \quad (104)$$

Магнитное напряжение магнитной цепи на пару полюсов:

$$F_J = F_{\delta} + F_{Z1} + F_{Z2} + F_a + F_J = 1022 \text{ А.} \quad (105)$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи:

$$k_{\mu} = \frac{F_{ц}}{F_{\delta}} = 1,276. \quad (106)$$

Намагничивающий ток:

$$I_{\mu} = \frac{p \cdot F_{ц}}{0,9 \cdot m \cdot w_1 \cdot k_{об1}} = 47,408 \text{ А.} \quad (107)$$

Относительное значение:

$$I_{\mu}' = \frac{I_{\mu}}{I_{1НОМ}} = 0,225. \quad (108)$$

Параметры для номинального режима:

Активное сопротивление обмотки статора:

Размер крайнего нажимного кольца:

$$l_{крс} = 0,03 \text{ м.} \quad (109)$$

Длина пазовой части:

$$l_{п} = l_1 + 2 \cdot l_{крс} = 0,93 \text{ м.} \quad (110)$$

$$b_{кт} = \frac{\pi \cdot (D + h_{п})}{2p} \cdot \beta = 0,67 \text{ м.} \quad (111)$$

$$b = 2 \cdot b_{пров} = 0,0085 \text{ м.} \quad (112)$$

$$S = 0,007 \quad (113)$$

$$m_1 = \frac{(b + S)}{t_{Z1}} = 0,515. \quad (114)$$

$$K_{л} = \frac{1}{\sqrt{1 - m_1^2}} = 1,166. \quad (115)$$

$$K_{\text{ВЫЛ}} = \frac{1}{2} K_{\text{Л}} \cdot m_1 = 0,3. \quad (116)$$

$$B = 0,006. \quad (117)$$

Длина вылета лобовой части катушки:

$$l_{\text{ВЫЛ}} = K_{\text{ВЫЛ}} \cdot b_{\text{КТ}} + B + 0,5 \cdot h_{\text{П}} = 0,312 \text{ м}. \quad (118)$$

Средняя длина витка:

$$l_{\text{СР}} = 2 \cdot (l_{\text{П}} + l_{\text{Л}}) = 3,867 \text{ м}. \quad (119)$$

Длина проводников фазы в обмотке:

$$L = l_{\text{СР}} \cdot w_1 = 386,697 \text{ м}. \quad (120)$$

Активное сопротивление обмотки статора:

$$k_R = 1. \quad (121)$$

Для класса нагревостойкости изоляции F расчетная температура равна 115 градусам, для медных проводников:

$$\rho_v = \frac{10^{-6}}{41} = 2,439 \cdot 10^{-8}. \quad (122)$$

$$r_1 = k_R \cdot \rho_v \frac{L}{q_{\text{ЭФ}} \cdot a} = 0,206 \text{ Ом}. \quad (123)$$

Относительное значение:

$$r_1'' = r_1 \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_1} = 0,0075. \quad (124)$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора:

Для вставных стержней обмотки ротора:

$$\rho_c = \frac{10^{-6}}{41}. \quad (125)$$

$$\rho_{\text{КЛ}} = \frac{10^{-6}}{41}. \quad (126)$$

Средний диаметр замыкающих колец:

$$D_{\text{КЛСР}} = D_2 - h_{\text{КЛ}} = 0,508 \text{ м}. \quad (127)$$

Активно сопротивление фазы обмотки ротора:

$$k_r = 1 \quad (128)$$



Размер крайнего нажимного кольца:

$$l_{\text{крр}} = 0,03 \text{ м.} \quad (129)$$

Размер вылета стержня:

$$l_{\text{вылст}} = 0,05 \text{ м.} \quad (130)$$

$$l_c = l_1 + 2 \cdot l_{\text{крр}} + 2 \cdot l_{\text{вылст}} = 1,03 \text{ м.} \quad (131)$$

$$r_c = \rho_c \cdot k_r \frac{l_c}{q_c} = 7,533 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (132)$$

$$r_{\text{кл}} = \rho_{\text{кл}} \frac{\pi \cdot D_{\text{кльср}}}{Z_2 \cdot \rho_{\text{кл}}} = 2,944 \cdot 10^{-7} \text{ Ом.} \quad (133)$$

$$r_2 = r_c + 2 \frac{r_{\text{кл}}}{\Delta^2} = 1,069 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.} \quad (134)$$

$$k_{\text{ск}} = 1. \quad (135)$$

Приведем  $r_2$  к числу витков обмотки статора:

$$r_2' = r_2 \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{\text{об1}})^2}{Z_2 \cdot k_{\text{ск}}} = 0,178 \text{ м.} \quad (136)$$

$$r_2'' = r_2' \frac{I_{1\text{НОМ}}}{U_1} = 0,0065. \quad (137)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния:

$$l_\delta' = l_1 - 0,5 \cdot n_k \cdot b_k = 0,82 \text{ м.} \quad (138)$$

$$h_2 = h_\pi - h_{\text{шст}} - h_k = 0,075 \text{ м.} \quad (139)$$

$$h_0 = 0,006 \text{ м.} \quad (140)$$

$$\beta = 0,63. \quad (141)$$

$$k_\beta' = 0,25 \cdot (6\beta - 1) = 0,695. \quad (142)$$

$$k_\beta = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot k_\beta') = 0,771. \quad (143)$$

$$\lambda_{\pi 1} = \frac{(h_2 - h_0) \cdot k_\beta}{3 \cdot b_\pi} + \frac{(h_{\text{шст}} + h_k) \cdot k_\beta'}{b_\pi} + \frac{h_0}{4 \cdot b_\pi} = 2,416. \quad (144)$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния:

$$\lambda_{\text{л1}} = 0,34 \cdot \frac{q}{l_\delta'} \cdot (l_\pi - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 2,416. \quad (145)$$

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		19

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния:

$$\Delta z = 0,06. \quad (146)$$

$$\varepsilon = \left( 2 \cdot \frac{t_{z2}}{t_{z1}} - \frac{t_{z1}}{t_{z2}} \cdot \Delta z \right) \cdot k_{\beta} - k_{об1}^2 \cdot \left( \frac{t_{z2}}{t_{z1}} \right)^2 = 0,894. \quad (147)$$

$$\lambda_{д1} = \frac{t_{z1}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \varepsilon = 0,284. \quad (148)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора:

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left( \frac{w_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_{\delta}}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) = 3,466 \text{ Ом}. \quad (149)$$

$$x_1'' = x_1 \cdot \frac{I_{1НОМ}}{U_1} = 0,126. \quad (150)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния:

$$k_d = 1. \quad (151)$$

$$\lambda_{п2} = \frac{2,3 \cdot D_{клср}}{Z_2 \cdot \Delta^2 \cdot l_{\delta}} \cdot \log \left( \frac{4,7 \cdot D_{клср}}{2 \cdot (b_{кл} + h_{кл})} \right) = 1,74. \quad (152)$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки:

$$\Delta z = 0,02. \quad (153)$$

$$\varepsilon = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left( \frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta z}{1 - \left( \frac{p}{Z_2} \right)^2} = 0,981. \quad (154)$$

$$\lambda_{д2} = \frac{t_{z2}}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \varepsilon = 0,397. \quad (155)$$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора:

$$x_2 = 7,9 \cdot f \cdot l_{\delta} \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda_{п1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) = 1,648 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}. \quad (156)$$

Приведенное к числу витков обмотки статора индуктивное сопротивление обмотки ротора:

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (w_1 \cdot k_{об1})^2}{Z_2 \cdot k_{ск}} = 0,178 \text{ Ом}. \quad (157)$$

Относительное значение:

					<i>ИОУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		20

$$x_2'' = x_2 \cdot \frac{I_{1НОМ}}{U_1} = 0,1. \quad (158)$$

$$x_{12} = \frac{U_1}{I_\mu} - x_1 = 118,317 \text{ Ом}. \quad (159)$$

Расчет потерь.

Основные потери в стали:

$$p_{1050} = 1,1. \quad (160)$$

Для машин свыше 250 кВт:

$$k_{да} = 1,4. \quad (161)$$

$$k_{дZ} = 1,7. \quad (162)$$

$$\beta = 1,4. \quad (163)$$

Масса стали ярма и зубцов статора:

$$\gamma_c = 7800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}. \quad (164)$$

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot l_{ст1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 3812 \text{ кг}. \quad (165)$$

$$m_{Z1} = h_n \cdot b_{Z1ср} \cdot Z_1 \cdot l_{ст1} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 698,611 \text{ кг}. \quad (166)$$

$$P_{стосн} = p_{1050} \cdot \left(\frac{f}{50}\right)^\beta \cdot (B_a^2 \cdot k_{да} \cdot m_a + k_{дZ} \cdot B_{Z1ср}^2 \cdot m_{Z1}) = 6280 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}. \quad (167)$$

Поверхностные потери в роторе:

$$k_{01} = 2. \quad (168)$$

$$k_{02} = 2. \quad (169)$$

По рис.9.53 определяем:

$$\frac{b_{ш}}{\delta} = 0,462. \quad (170)$$

$$\beta_{01} = 0,16. \quad (171)$$

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_\delta \cdot B_\delta = 0,124 \text{ Тл}. \quad (172)$$

Потери, приходящиеся на 1 кв.м поверхности головок зубцов статора:

$$p_{пов1} = 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{10000}\right)^{1,5} \cdot (B_{01}^2 \cdot t_{Z2} \cdot 1000)^2 = 1726 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}. \quad (173)$$

$$P_{\text{пов1}} = p_{\text{пов1}} \cdot (t_{Z1} - b_{\text{п}}) \cdot Z_1 \cdot l_{\text{ст1}} = 1141 \text{ Вт.} \quad (174)$$

$$\beta_{02} = 0,03. \quad (175)$$

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0,023. \quad (176)$$

Потери, приходящиеся на 1 кв.м поверхности головок зубцов ротора:

$$p_{\text{пов2}} = 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02}^2 \cdot t_{Z1} \cdot 1000)^2 = 37,339 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}. \quad (177)$$

$$P_{\text{пов2}} = p_{\text{пов2}} \cdot (t_{Z2} - b_{\text{ш}}) \cdot Z_2 \cdot l_{\text{ст2}} = 46,795 \text{ Вт.} \quad (178)$$

Пульсационные потери в зубцах ротора:

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов:

$$B_{\text{пул1}} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_{Z1}} \cdot B_{Z1\text{ср1}} = 4,597 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.} \quad (179)$$

$$B_{\text{пул2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{Z2}} \cdot B_{Z2\text{ср1}} = 0,079 \text{ Тл.} \quad (180)$$

$$P_{\text{пул1}} = 0,11 \cdot \left( \frac{Z_2 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пул1}} \right)^2 \cdot m_{Z1} = 30,929 \text{ Вт.} \quad (181)$$

Масса стали зубцов ротора:

$$m_{Z2} = h_{\text{п2}} \cdot b_{Z2\text{ср}} \cdot Z_2 \cdot l_{\text{ст2}} \cdot k_c \cdot \gamma_c = 346,789 \text{ кг.} \quad (182)$$

$$P_{\text{пул2}} = 0,11 \cdot \left( \frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пул2}} \right)^2 \cdot m_{Z2} = 7657 \text{ Вт.} \quad (183)$$

Сумма добавочных потерь в стали:

$$P_{\text{стдоб}} = P_{\text{пов1}} + P_{\text{пов2}} + P_{\text{пул1}} + P_{\text{пул2}} = 8876 \text{ Вт.} \quad (184)$$

Полные потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{стосн}} + P_{\text{стдоб}} = 15160 \text{ Вт.} \quad (185)$$

Механические потери:

$$k_{\text{T}} = 3,65. \quad (186)$$

$$P_{\text{мех}} = 15000 \text{ Вт.} \quad (187)$$

Холостой ход двигателя:

Активная составляющая тока:

$$P_{\text{э1хх}} = m \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 1386 \text{ Вт.} \quad (188)$$

$$I_{\text{xxa}} = \frac{P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э1xx}}}{m \cdot U_1} = 1821 \text{ А.} \quad (189)$$

Реактивная составляющая:

$$I_{\text{ххр}} = I_{\mu} = 47,408 \text{ А.} \quad (190)$$

Ток холостого хода:

$$I_{\text{хх}} = \sqrt{I_{\text{хха}}^2 + I_{\text{ххр}}^2} = 47,443 \text{ А.} \quad (191)$$

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos\varphi_{\text{хх}} = \frac{I_{\text{хха}}}{I_{\text{хх}}} = 0,038. \quad (192)$$

Расчет рабочих характеристик:

Параметры:

$$r_{12} = \frac{P_{\text{стосн}}}{m \cdot I_{\mu}^2} = 0,931 \text{ Ом.} \quad (193)$$

$$x_{12} = \frac{U_1}{I_{\mu}} - x_1 = 118,317 \text{ Ом.} \quad (194)$$

$$c_{1a} = \frac{(r_{12}(r_1 + r_{12}) + (x_1 + x_{12}))}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = 1,03. \quad (195)$$

$$c_{1p} = \frac{x_{12} \cdot r_{12} - r_1 \cdot x_{12}}{r_{12}^2 + x_{12}^2} = -1,507 \cdot 10^{-3}. \quad (196)$$

$$c_1 = \sqrt{c_{1a}^2 + c_{1p}^2} = 1,03. \quad (197)$$

Активная составляющая тока синхронного холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{стосн}} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = 0,443 \text{ А.} \quad (198)$$

$$a' = c_{1a}^2 - c_{1p}^2 = 1,06. \quad (199)$$

$$b' = 2 \cdot c_{1a} \cdot c_{1p} = -3,102 \cdot 10^{-3}. \quad (200)$$

$$b = c_{1a} \cdot x_1 + c_{1p} \cdot r_1 + a' \cdot x_2' = 6,472. \quad (201)$$

$$a = c_{1a} \cdot r_1 - c_{1p} \cdot x_1 - b' \cdot x_2' = 0,225. \quad (202)$$

Потери, не изменяющиеся при изменении скольжения:

$$P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} = 30160 \text{ Вт.} \quad (203)$$

Рассчитаем рабочие характеристики:

$$s_{\text{НОМ}} = r_2'' = 0,0065. \quad (204)$$

$$s = 0,0.001 \dots 0.03.$$

$$k1(s) = \frac{a' \cdot r_2'}{s}. \quad (205)$$

$$k2(s) = \frac{b' \cdot r_2'}{s}. \quad (206)$$

$$R(s) = a + \frac{a' \cdot r_2'}{s}. \quad (207)$$

$$X(s) = b + k2(s). \quad (208)$$

$$Z(s) = \sqrt{R(s)^2 + X(s)^2}. \quad (209)$$

$$I_2''(s) = \frac{U_1}{Z(s)}. \quad (210)$$

$$\cos\varphi_2'(s) = \frac{R(s)}{Z(s)}. \quad (211)$$

$$\sin\varphi_2'(s) = \frac{X(s)}{Z(s)}. \quad (212)$$

$$I_{1a}(s) = I_{0a} + I_2''(s) \cdot \cos\varphi_2'(s). \quad (213)$$

$$I_{1p}(s) = I_{0p} + I_2''(s) \cdot \sin\varphi_2'(s). \quad (214)$$

$$I_1(s) = \sqrt{I_{1a}(s)^2 + I_{1p}(s)^2}. \quad (215)$$

$$I_2'(s) = c_1 \cdot I_2''(s). \quad (216)$$

$$P_1(s) = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a}(s). \quad (217)$$

$$P_{\text{эл}1}(s) = 3 \cdot I_1'(s)^2 \cdot r_1'. \quad (218)$$

$$P_{\text{эл}2}(s) = 3 \cdot I_2'(s)^2 \cdot r_2'. \quad (219)$$

$$P_{\text{доб}}(s) = 0,005 \cdot P_1(s). \quad (220)$$

$$\Sigma P(s) = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{эл}1}(s) + P_{\text{доб}2}(s). \quad (221)$$

$$P_2(s) = P_1(s) - \Sigma P(s). \quad (222)$$

$$\eta(s) = 1 - \frac{\Sigma P(s)}{P_1(s)}. \quad (223)$$

$$\cos\varphi(s) = \frac{I_{1a}(s)}{I_1(s)}. \quad (224)$$

В результате были получены графики рабочих характеристик.

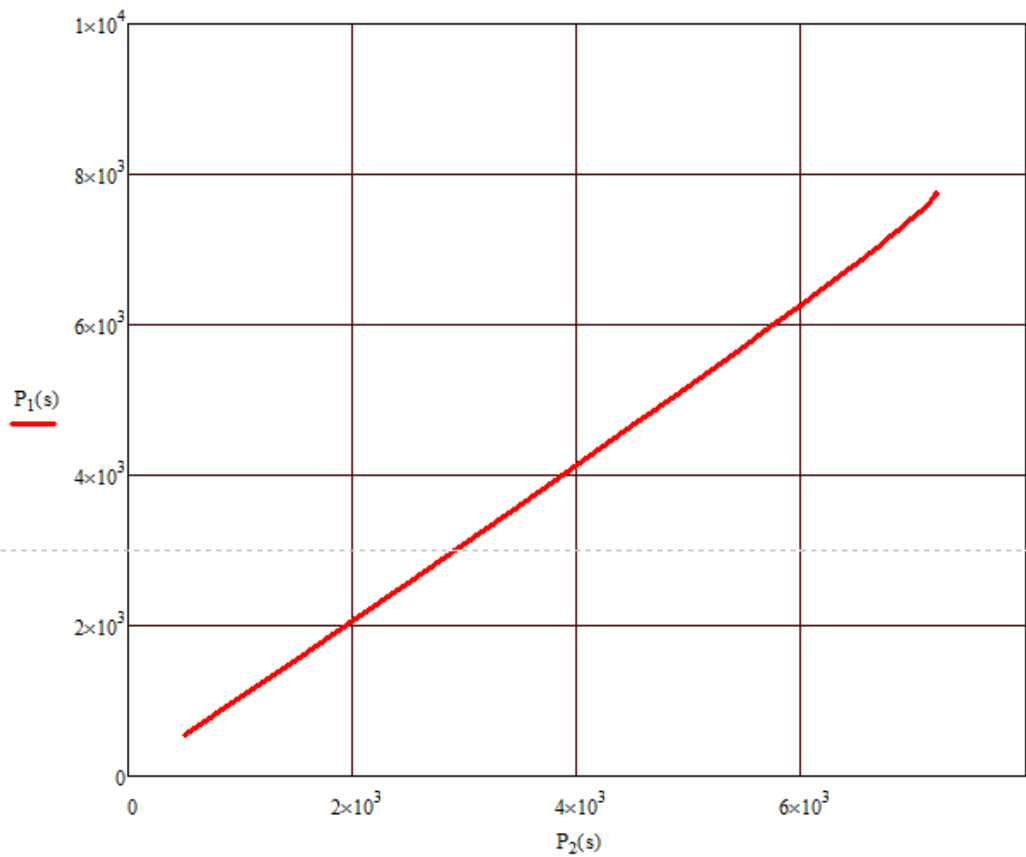


Рисунок 1 – График зависимости  $P1$  от  $P2$

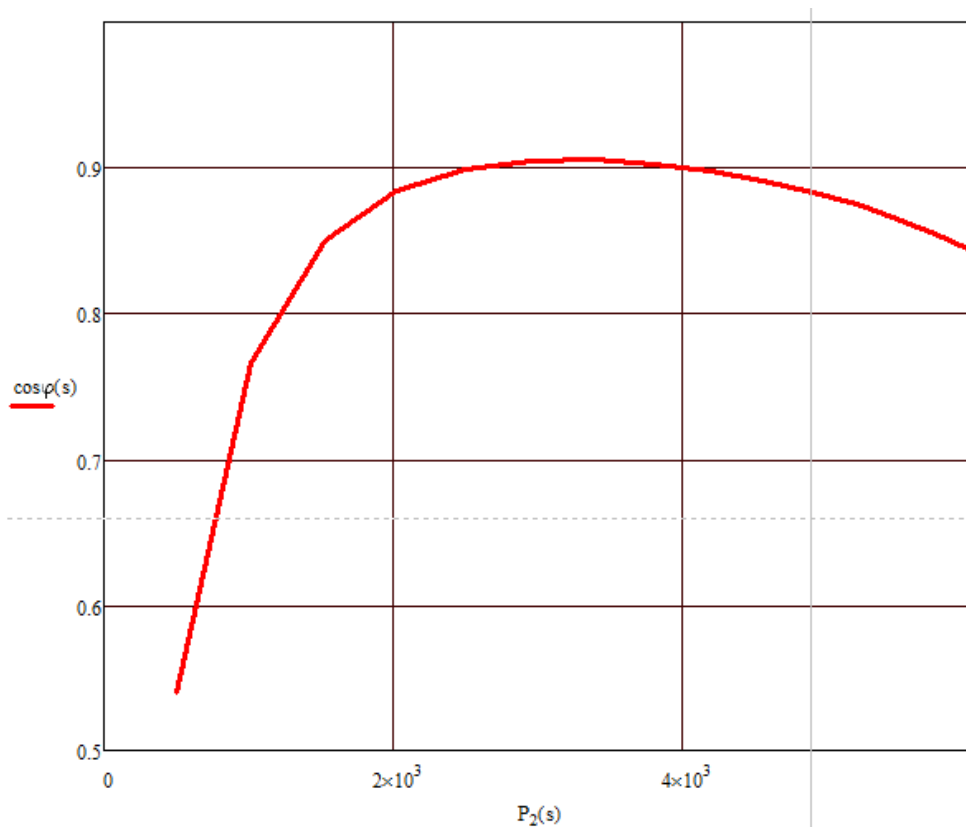


Рисунок 2 – График зависимости  $\cos\varphi$  от  $P_2$

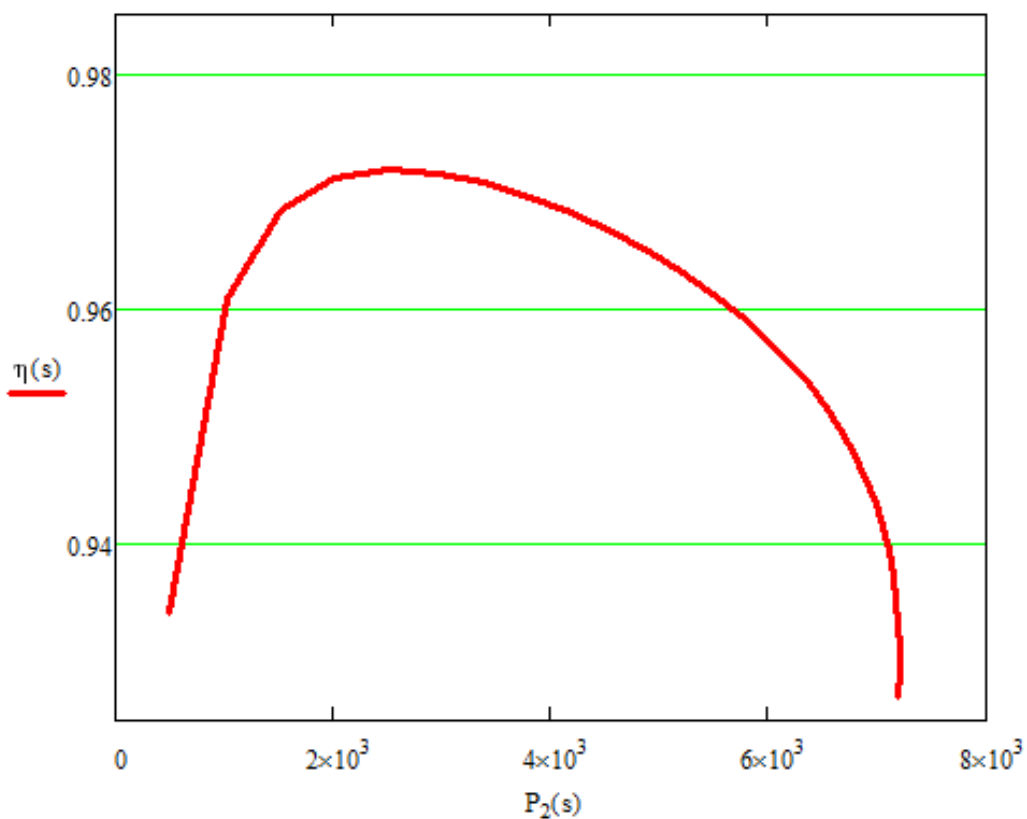


Рисунок 3 – График зависимости  $\eta$  от  $P_2$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



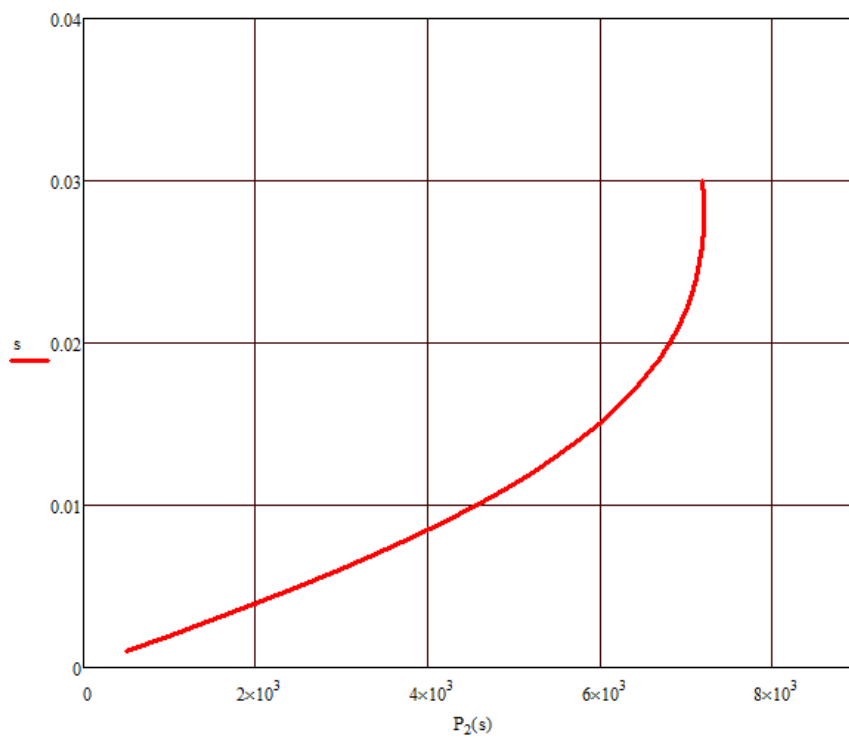


Рисунок 4 – График зависимости  $s$  от  $P_2$

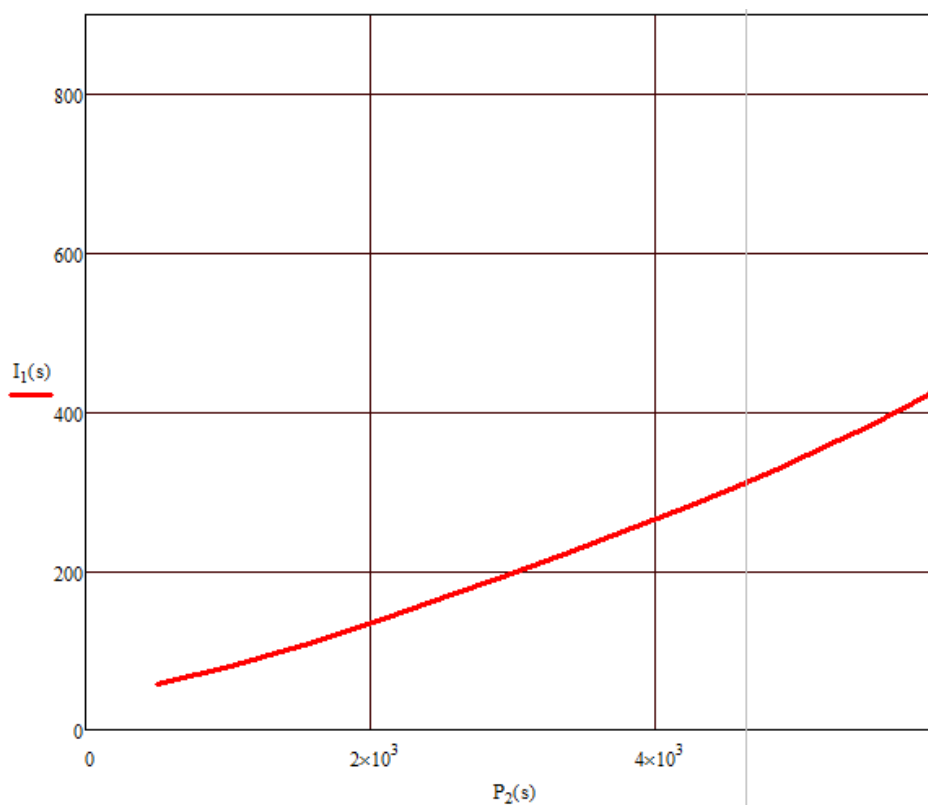


Рисунок 5 – График зависимости  $I_1$  от  $P_2$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

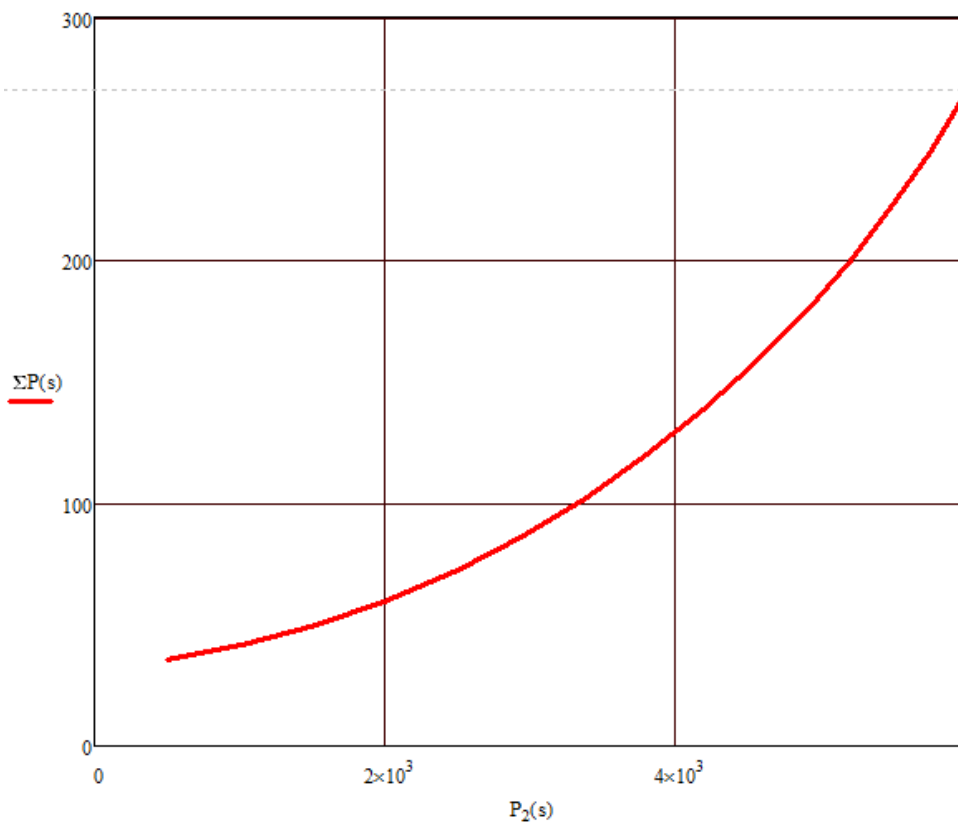


Рисунок 6 – График зависимости  $\Sigma P$  от  $P_2$

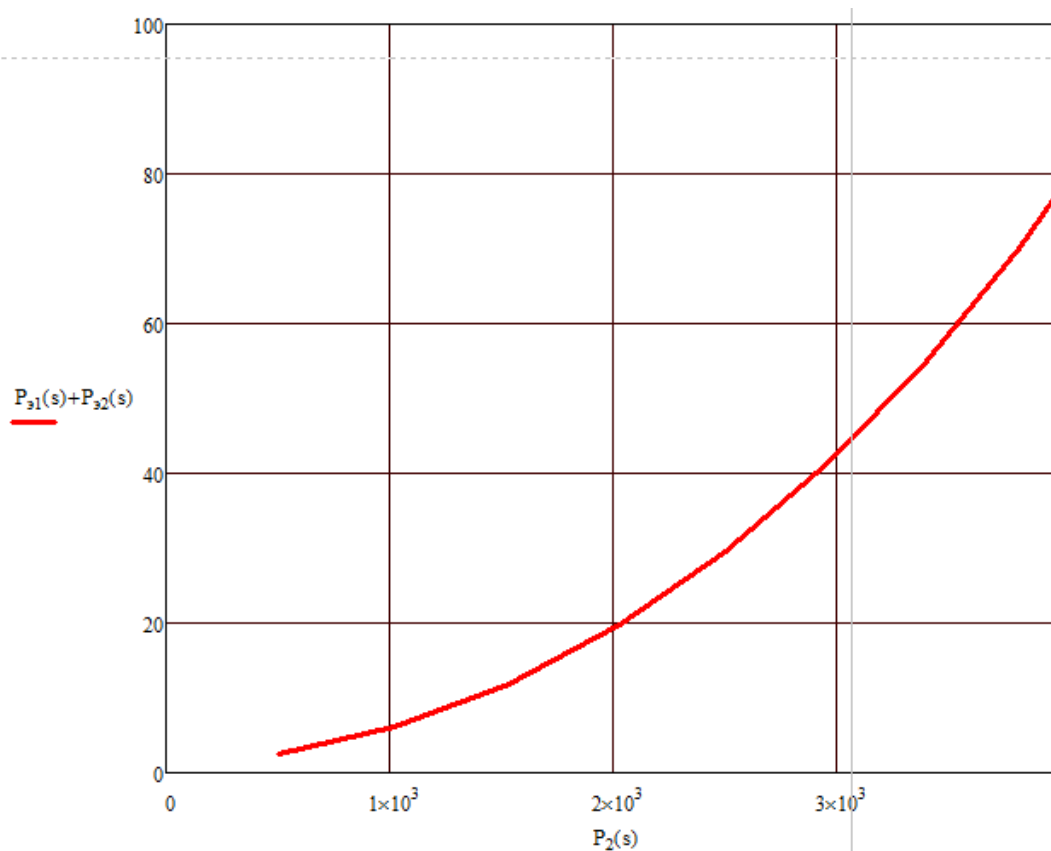


Рисунок 7 – График зависимости суммарных потерь от  $P_2$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$s_{\text{НОМ}} = 0,0065.$$

$$k1 = \frac{a \cdot r_2}{s} = 28,991. \quad (225)$$

$$k2 = \frac{b \cdot r_2}{s} = -0,085. \quad (226)$$

$$R = a + \frac{a \cdot r_2}{s} = 29,216 \text{ Ом.} \quad (227)$$

$$X = b + k2 = 6,387 \text{ Ом.} \quad (228)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 29,906 \text{ Ом.} \quad (229)$$

$$I_2 = \frac{U_1}{Z} = 193,057 \text{ А.} \quad (230)$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{R}{Z} = 0,977. \quad (231)$$

$$\sin\varphi_2 = \frac{X}{Z} = 0,214. \quad (232)$$

$$I_{1a} = I_{0a} + I_2 \cdot \cos\varphi_2 = 189,045 \text{ А.} \quad (233)$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I_2 \cdot \sin\varphi_2 = 88,637 \text{ А.} \quad (234)$$

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2} = 208,793 \text{ А.} \quad (235)$$

$$I_2 = c_1 \cdot I_2 = 198,715 \text{ А.} \quad (236)$$

$$P_1 = 3 \cdot U_1 \cdot I_{1a} = 3274 \text{ Вт.} \quad (237)$$

$$P_{\text{э1}} = 3 \cdot I_1^2 \cdot r_1 = 26,885 \text{ Вт.} \quad (238)$$

$$P_{\text{э2}} = 3 \cdot I_2^2 \cdot r_2 = 21,07 \text{ Вт.} \quad (239)$$

$$P_{\text{доб}} = 0,005 \cdot P_1 = 16,372 \text{ Вт.} \quad (240)$$

$$\Sigma P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{эл1}} + P_{\text{доб2}} = 94,483 \text{ Вт.} \quad (241)$$

$$P_2 = P_1 - \Sigma P = 3180 \text{ Вт.} \quad (242)$$

$$\eta(s) = 1 - \frac{\Sigma P}{P_1} = 0,971. \quad (243)$$

$$\cos\varphi(s) = \frac{I_{1a}(s)}{I_1(s)} = 0,905. \quad (244)$$

Расчет пусковых характеристик.

Расчет токов с учетом влияния измерения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока.

Активное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$\rho_c = \frac{10^{-6}}{41}. \quad (245)$$

$$h_c = h_{c2} = 0,053 \text{ м}. \quad (246)$$

$$f_2 = 50 \text{ Гц}. \quad (247)$$

$$b_c = 0,9 \cdot b_{п2} = 7,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \quad (248)$$

Первая точка:

$$s_1 = 1. \quad (249)$$

$$\varepsilon_1 = 89,96 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_1} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_{п2}}} = 4,498. \quad (250)$$

По рисунку 9.57:

$$\varphi_1 = 3,498. \quad (251)$$

$$h_{r1} = \frac{h_c}{1 + \varphi_1} = 0,012. \quad (252)$$

$$k_{r1} = \frac{h_c}{h_{r1}} = 4,498. \quad (253)$$

$$r_{c1} = r_c \cdot \frac{l_c - n_k \cdot b_k - 2 \cdot l_{кпп}}{l_1 + 2 \cdot l_{кпп}} = 7,047 \cdot 10^{-5}. \quad (254)$$

$$K_{R1} = 1 + \frac{r_{c1}}{r_2} \cdot \varphi_1 = 3,305. \quad (255)$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r_{2\varepsilon1} = K_{R1} \cdot r_2 = 0,588. \quad (256)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

По рисунку 9.58:

					<i>ИОУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		30

$$\varphi_1 = \frac{3}{2 \cdot \varepsilon_1} = 0,334. \quad (257)$$

$$k_{д1} = \varphi_1 = 0,334. \quad (258)$$

$$\lambda_{п2} = \frac{h_{c2}}{3 \cdot b_{п2}} = 2,116. \quad (259)$$

$$\Delta\lambda_{п2\varepsilon_1} = \lambda_{п2} \cdot (1 - k_{д1}) = 1,411. \quad (260)$$

$$\lambda_{п2\varepsilon_1} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\varepsilon_1} = 1,539. \quad (261)$$

$$K_{x1} = \frac{\lambda_{п2\varepsilon_1} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,723. \quad (262)$$

$$x_{2\varepsilon_1} = x_2 \cdot K_{x1} = 1,981. \quad (263)$$

Пусковые параметры:

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 151,003 \text{ Ом}. \quad (264)$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1,023. \quad (265)$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} + r_{2\varepsilon_1}}{s_1} = 0,807 \text{ Ом}. \quad (266)$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x_{2\varepsilon_1} = 5,493 \text{ Ом}. \quad (267)$$

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = 1040 \text{ А}. \quad (268)$$

$$I_{1\text{выт1}} = I_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}} = 1054 \text{ А}. \quad (269)$$

Вторая точка:

$$s_2 = 0,8. \quad (270)$$

$$\varepsilon_2 = 89,96 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_2} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_{п2}}} = 4,023. \quad (271)$$

По рисунку 9.57:

$$\varphi_1 = 3,023. \quad (272)$$

$$h_{r2} = \frac{h_c}{1 + \varphi_2} = 0,013. \quad (273)$$

$$k_{r2} = \frac{h_c}{h_{r2}} = 4,023. \quad (274)$$

$$r_{c1}' = r_c \cdot \frac{l_c - n_k \cdot b_k - 2 \cdot l_{кпп}}{l_1 + 2 \cdot l_{кпп}} = 7,047 \cdot 10^{-5}. \quad (275)$$

$$K_{R2} = 1 + \frac{r_{c1}'}{r_2} \cdot \varphi_2 = 2,992. \quad (276)$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r_{2\varepsilon_2}' = K_{R2} \cdot r_2' = 0,532. \quad (277)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

По рисунку 9.58:

$$\varphi_2' = \frac{3}{2 \cdot \varepsilon_2} = 0,373. \quad (278)$$

$$k_{д1} = \varphi_1' = 0,373. \quad (279)$$

$$\lambda_{п2}' = \frac{h_{c2}}{3 \cdot b_{п2}} = 2,116. \quad (280)$$

$$\Delta\lambda_{п2\varepsilon_2} = \lambda_{п2}' \cdot (1 - k_{д2}) = 1,327. \quad (281)$$

$$\lambda_{п2\varepsilon_2} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\varepsilon_2} = 1,623. \quad (282)$$

$$K_{x2} = \frac{\lambda_{п2\varepsilon_2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,739. \quad (283)$$

$$x_{2\varepsilon_2}' = x_2' \cdot K_{x2} = 2,026. \quad (284)$$

Пусковые параметры:

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 151,003 \text{ Ом}. \quad (285)$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1,023. \quad (286)$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} + r_{2\varepsilon_2}'}{s_2} = 0,886 \text{ Ом}. \quad (287)$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x_{2\varepsilon_2}' = 5,539 \text{ Ом}. \quad (288)$$

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = 1029 \text{ А}. \quad (289)$$

$$I_{1\text{ВЫТ}2} = I_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}} = 1043 \text{ А.} \quad (290)$$

Третья точка:

$$s_3 = 0,5. \quad (291)$$

$$\varepsilon_3 = 89,96 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_3} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_{\Pi 2}}} = 3,18. \quad (292)$$

По рисунку 9.57:

$$\varphi_3 = 2,18. \quad (293)$$

$$h_{r3} = \frac{h_c}{1 + \varphi_3} = 0,017. \quad (294)$$

$$k_{r3} = \frac{h_c}{h_{r3}} = 3,18. \quad (295)$$

$$r_{c1} = r_c \cdot \frac{l_c - n_k \cdot b_k - 2 \cdot l_{\text{кpp}}}{l_1 + 2 \cdot l_{\text{кpp}}} = 7,047 \cdot 10^{-5}. \quad (296)$$

$$K_{R1} = 1 + \frac{r_{c1}}{r_2} \cdot \varphi_1 = 2,437. \quad (297)$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r_{2\varepsilon 3} = K_{R3} \cdot r_2 = 0,433. \quad (298)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока.

По рисунку 9.58:

$$\varphi_3 = 0,48. \quad (299)$$

$$k_{д3} = \varphi_3 = 0,48. \quad (300)$$

$$\lambda_{\Pi 2} = \frac{h_{c2}}{3 \cdot b_{\Pi 2}} = 2,116. \quad (301)$$

$$\Delta\lambda_{\Pi 2\varepsilon 3} = \lambda_{\Pi 2} \cdot (1 - k_{д3}) = 1,101. \quad (302)$$

$$\lambda_{\Pi 2\varepsilon 1} = \lambda_{\Pi 2} - \Delta\lambda_{\Pi 2\varepsilon 3} = 1,849. \quad (303)$$

$$K_{x3} = \frac{\lambda_{\Pi 2\varepsilon 3} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{\Pi 2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,784. \quad (304)$$

$$x_{2\varepsilon_3} = x_2 \cdot K_{x3} = 2,148. \quad (305)$$

Пусковые параметры:

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 151,003 \text{ Ом}. \quad (306)$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1,023. \quad (307)$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} + r_{2\varepsilon_3}}{s_3} = 1,092 \text{ Ом}. \quad (308)$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x_{2\varepsilon_3} = 5,664 \text{ Ом}. \quad (309)$$

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = 1001 \text{ А}. \quad (310)$$

$$I_{1\text{выт3}} = I_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}} = 1015 \text{ А}. \quad (311)$$

Четвертая точка:

$$s_4 = 0,2. \quad (312)$$

$$\varepsilon_4 = 89,96 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_4} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_{п2}}} = 2,011. \quad (313)$$

По рисунку 9.57:

$$\varphi_4 = 0,9. \quad (314)$$

$$h_{r4} = \frac{h_c}{1 + \varphi_4} = 0,028. \quad (315)$$

$$k_{r4} = \frac{h_c}{h_{r4}} = 1,9. \quad (316)$$

$$r_{c1} = r_c \cdot \frac{l_c - n_k \cdot b_k - 2 \cdot l_{кпп}}{l_1 + 2 \cdot l_{кпп}} = 7,047 \cdot 10^{-5}. \quad (317)$$

$$K_{R4} = 1 + \frac{r_{c1}}{r_2} \cdot \varphi_4 = 1,593. \quad (318)$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r_{2\varepsilon_4} = K_{R4} \cdot r_2 = 0,283. \quad (319)$$



Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

По рисунку 9.58:

$$\varphi_4 = \frac{3}{2 \cdot \varepsilon_1} = 0,75. \quad (320)$$

$$k_{д4} = \varphi_4 = 0,75. \quad (321)$$

$$\lambda_{п2} = \frac{h_{с2}}{3 \cdot b_{п2}} = 2,116. \quad (322)$$

$$\Delta\lambda_{п2\varepsilon_4} = \lambda_{п2} \cdot (1 - k_{д4}) = 0,529. \quad (323)$$

$$\lambda_{п2\varepsilon_4} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\varepsilon_4} = 2,421. \quad (324)$$

$$K_{x4} = \frac{\lambda_{п2\varepsilon_4} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,896. \quad (325)$$

$$x_{2\varepsilon_4} = x_2 \cdot K_{x4} = 2,456. \quad (326)$$

Пусковые параметры:

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 151,003 \text{ Ом}. \quad (327)$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1,023. \quad (328)$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} + r_{2\varepsilon_4}}{s_4} = 1,655 \text{ Ом}. \quad (329)$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x_{2\varepsilon_4} = 5,979 \text{ Ом}. \quad (330)$$

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = 930,709 \text{ А}. \quad (331)$$

$$I_{1\text{выт}4} = I_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{п}^2 + (X_{п} + x_{12п})^2}}{c_{1п} \cdot x_{12п}} = 945,898 \text{ А}. \quad (332)$$

Пятая точка:

$$s_5 = 0,1. \quad (333)$$

$$\varepsilon_5 = 89,96 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_5} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_{п2}}} = 1,422. \quad (334)$$

По рисунку 9.57:

$$\varphi_5 = 0,29. \quad (335)$$

$$h_{r5} = \frac{h_c}{1 + \varphi_5} = 0,041. \quad (336)$$

$$k_{r5} = \frac{h_c}{h_{r5}} = 1,29. \quad (337)$$

$$r_{c1} = r_c \cdot \frac{l_c - n_k \cdot b_k - 2 \cdot l_{кpp}}{l_1 + 2 \cdot l_{кpp}} = 7,047 \cdot 10^{-5}. \quad (338)$$

$$K_{R5} = 1 + \frac{r_{c1}}{r_2} \cdot \varphi_5 = 1,191. \quad (339)$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r_{2\varepsilon5} = K_{R5} \cdot r_2 = 0,212. \quad (340)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

По рисунку 9.58:

$$\varphi_5 = \frac{3}{2 \cdot \varepsilon_1} = 0,9. \quad (341)$$

$$k_{д5} = \varphi_5 = 0,95. \quad (342)$$

$$\lambda_{п2} = \frac{h_{c2}}{3 \cdot b_{п2}} = 2,116. \quad (343)$$

$$\Delta\lambda_{п2\varepsilon5} = \lambda_{п2} \cdot (1 - k_{д5}) = 0,212. \quad (344)$$

$$\lambda_{п2\varepsilon5} = \lambda_{п2} - \Delta\lambda_{п2\varepsilon5} = 2,738. \quad (345)$$

$$K_{x5} = \frac{\lambda_{п2\varepsilon5} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,958. \quad (346)$$

$$x_{2\varepsilon5} = x_2 \cdot K_{x5} = 2,627. \quad (347)$$

Пусковые параметры:

$$x_{12п} = k_\mu \cdot x_{12} = 151,003 \text{ Ом}. \quad (348)$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1,023. \quad (349)$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} + r_{2\varepsilon5}}{s_5} = 2,373 \text{ Ом}. \quad (350)$$

$$X_{\Pi} = x_1 + c_{1\Pi} \cdot x_{2\varepsilon_5} = 6,153 \text{ Ом.} \quad (351)$$

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\Pi}^2 + X_{\Pi}^2}} = 875,424 \text{ А.} \quad (352)$$

$$I_{1\text{выт5}} = I_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}} = 890,753 \text{ А.} \quad (353).$$

Шестая точка:

$$s_{\text{кр}} = \frac{r_2}{\frac{x_1}{c_{1\Pi}} + r_2} = 0,029. \quad (354)$$

$$s_6 = s_{\text{кр}} = 0,029. \quad (355)$$

$$\varepsilon_6 = 89,96 \cdot h_c \cdot \sqrt{s_6} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_{\Pi 2}}} = 0,766. \quad (356)$$

По рисунку 9.57:

$$\varphi_6 = 0,89 \cdot \varepsilon_6^4 = 0,307. \quad (357)$$

$$h_{r6} = \frac{h_c}{1 + \varphi_6} = 0,04. \quad (358)$$

$$k_{r6} = \frac{h_c}{h_{r6}} = 1,307. \quad (359)$$

$$r_{c1} = r_c \cdot \frac{l_c - n_k \cdot b_k - 2 \cdot l_{\text{крп}}}{l_1 + 2 \cdot l_{\text{крп}}} = 7,047 \cdot 10^{-5}. \quad (360)$$

$$K_{R6} = 1 + \frac{r_{c1}}{r_2} \cdot \varphi_6 = 1,202. \quad (361)$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r_{2\varepsilon_6} = K_{R6} \cdot r_2 = 0,214. \quad (362)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

По рисунку 9.58:

$$\varphi_6 = 0,95. \quad (363)$$

$$k_{д6} = \varphi_6 = 0,95. \quad (364)$$

$$\lambda_{\pi 2} = \frac{h_{c2}}{3 \cdot b_{\pi 2}} = 2,116. \quad (365)$$

$$\Delta \lambda_{\pi 2 \varepsilon_6} = \lambda_{\pi 2} \cdot (1 - k_{\pi 6}) = 0,106. \quad (366)$$

$$\lambda_{\pi 2 \varepsilon_6} = \lambda_{\pi 2} - \Delta \lambda_{\pi 2 \varepsilon_6} = 2,844. \quad (367)$$

$$K_{x6} = \frac{\lambda_{\pi 2 \varepsilon_6} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2}}{\lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2} + \lambda_{\pi 2}} = 0,979. \quad (368)$$

$$x_{2 \varepsilon_6} = x_2 \cdot K_{x6} = 2,684. \quad (369)$$

Пусковые параметры:

$$x_{12 \pi} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 151,003 \text{ Ом}. \quad (370)$$

$$c_{1 \pi} = 1 + \frac{x_1}{x_{12 \pi}} = 1,023. \quad (371)$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$R_{\pi} = r_1 + \frac{c_{1 \pi} + r_{2 \varepsilon_6}}{s_6} = 7,743 \text{ Ом}. \quad (372)$$

$$X_{\pi} = x_1 + c_{1 \pi} \cdot x_{2 \varepsilon_6} = 6,153 \text{ Ом}. \quad (373)$$

$$I_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\pi}^2 + X_{\pi}^2}} = 583,76 \text{ А}. \quad (374)$$

$$I_{1 \text{выт6}} = I_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{\pi}^2 + (X_{\pi} + x_{12 \pi})^2}}{c_{1 \pi} \cdot x_{12 \pi}} = 594,635 \text{ А}. \quad (375)$$

Седьмая точка:

$$s_7 = \frac{r_2}{\frac{x_1}{c_{1 \pi}} + r_2} = 0,35. \quad (376)$$

$$\varepsilon_7 = 89,96 \cdot h_c \cdot \sqrt{7} \cdot \sqrt{\frac{b_c}{b_{\pi 2}}} = 2,661. \quad (377)$$

По рисунку 9.57:

$$\varphi_7 = 1,65. \quad (378)$$

$$h_{r7} = \frac{h_c}{1 + \varphi_7} = 0,02. \quad (379)$$

$$k_{r7} = \frac{h_c}{h_{r7}} = 2,65. \quad (380)$$

$$r_{c1}^{\cdot} = r_c \cdot \frac{l_c - n_k \cdot b_k - 2 \cdot l_{кпп}}{l_1 + 2 \cdot l_{кпп}} = 7,047 \cdot 10^{-5}. \quad (381)$$

$$K_{R7} = 1 + \frac{r_{c1}^{\cdot}}{r_2} \cdot \varphi_7 = 2,087. \quad (382)$$

Приведенное сопротивление ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$r_{2\varepsilon7}^{\cdot} = K_{R7} \cdot r_2^{\cdot} = 0,371. \quad (383)$$

Индуктивное сопротивление обмотки ротора с учетом влияния эффекта вытеснения тока

По рисунку 9.58:

$$\varphi_7^{\cdot} = 0,55. \quad (384)$$

$$k_{д7} = \varphi_7^{\cdot} = 0,55. \quad (385)$$

$$\lambda_{п2}^{\cdot} = \frac{h_{c2}}{3 \cdot b_{п2}} = 2,116. \quad (386)$$

$$\Delta\lambda_{п2\varepsilon7} = \lambda_{п2}^{\cdot} \cdot (1 - k_{д7}) = 0,952. \quad (387)$$

$$\lambda_{п2\varepsilon7} = \lambda_{п2}^{\cdot} - \Delta\lambda_{п2\varepsilon7} = 1,997. \quad (388)$$

$$K_{x7} = \frac{\lambda_{п2\varepsilon7} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{л2} + \lambda_{д2}} = 0,813. \quad (389)$$

$$x_{2\varepsilon7}^{\cdot} = x_2^{\cdot} \cdot K_{x7} = 2,228. \quad (390)$$

Пусковые параметры:

$$x_{12п} = k_{\mu} \cdot x_{12} = 151,003 \text{ Ом}. \quad (391)$$

$$c_{1п} = 1 + \frac{x_1}{x_{12п}} = 1,023. \quad (392)$$

Расчет токов с учетом влияния эффекта вытеснения тока:

$$R_{п} = r_1 + \frac{c_{1п} + r_{2\varepsilon7}^{\cdot}}{s_7} = 1,291 \text{ Ом}. \quad (393)$$

$$X_{п} = x_1 + c_{1п} \cdot x_{2\varepsilon7}^{\cdot} = 5,745 \text{ Ом}. \quad (394)$$

$$I_2^{\cdot} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{п}^2 + X_{п}^2}} = 980,481 \text{ А}. \quad (395)$$

$$I_{1\text{ВЫГ7}} = I_2 \cdot \frac{\sqrt{R_{\Pi}^2 + (X_{\Pi} + x_{12\Pi})^2}}{c_{1\Pi} \cdot x_{12\Pi}} = 994,98 \text{ А.} \quad (396)$$

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

Первая точка:

$$s_1 = 1. \quad (397)$$

$$k_y = 0,836. \quad (398)$$

$$I_{1\text{ВЫГ1}} = 1054 \text{ А.} \quad (399)$$

$$k_{\text{нас}} = 1,1. \quad (400)$$

$$a = 2. \quad (401)$$

$$F_{\text{пср}} = 0,7 \cdot \frac{I_{1\text{ВЫГ1}} \cdot k_{\text{нас}} \cdot u_{\Pi}}{a} \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 12700 \text{ А.} \quad (402)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 1,41. \quad (403)$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{пср}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 0,866 \text{ Тл.} \quad (404)$$

По рисунку 9.61

$$k_{\delta} = 0,97. \quad (405)$$

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{Z1} - b_{\Pi})(1 - k_{\delta}) = 4,292 \cdot 10^{-4} \quad (406)$$

$$\Delta\lambda_{\Pi 1\text{нас}} = \frac{h_k + h_{\text{шст}}}{b_{\Pi}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{b_{\Pi} + c_{\varepsilon 1}} = 0,046. \quad (407)$$

$$\lambda_{\Pi 1\text{нас}} = \lambda_{\Pi 1} - \Delta\lambda_{\Pi 1\text{нас}} = 2,371. \quad (408)$$

$$\lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot k_{\delta} = 0,275. \quad (409)$$

$$x_{1\text{нас1}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\Pi 1\text{нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\Pi 1} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}} = 3,431 \text{ Ом.} \quad (410)$$

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{Z2} - b_{\text{ш}})(1 - k_{\delta}) = 1,061 \cdot 10^{-3}. \quad (411)$$

$$\Delta\lambda_{\Pi 2\text{нас}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{b_{\text{ш}} + c_{\varepsilon 2}} = 0,218. \quad (412)$$

$$\lambda_{\Pi 2\varepsilon\text{нас}} = \lambda_{\Pi 2\varepsilon 1} - \Delta\lambda_{\Pi 2\text{нас}} = 1,321. \quad (413)$$

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta} = 0,385. \quad (414)$$

$$x_{1нас1} = x_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\varepsilonнас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}} = 1,857 \text{ Ом}. \quad (415)$$

$$c_{1пнас} = 1 + \frac{x_{1нас1}}{x_{12п}} = 1,023. \quad (416)$$

$$r_{2\varepsilon1} = 0,588. \quad (417)$$

$$x_{2\varepsilon1} = 1,981. \quad (418)$$

$$R_{пнас} = r_1 + c_{1пнас} \cdot \frac{r_{2\varepsilon1}}{s_1} = 0,807 \text{ Ом}. \quad (419)$$

$$X_{пнас} = x_{1нас1} + c_{1пнас} \cdot x_{2\varepsilonнас1} = 5,33 \text{ Ом}. \quad (420)$$

$$I_{2нас} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{пнас}^2 + X_{пнас}^2}} = 1071 \text{ А}. \quad (421)$$

$$I_{1нас1} = I_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{пнас}^2 + (X_{пнас} + x_{12п})^2}}{c_{1пнас} \cdot x_{12п}} = 1084 \text{ А}. \quad (422)$$

$$I_{п1} = \frac{I_{1нас1}}{I_{1ном}} = 5,146. \quad (423)$$

$$M_{п1} = \left(\frac{I_{2нас}}{I_{2ном}}\right)^2 K_{R1} \frac{S_{ном}}{s_1} = 0,624. \quad (424)$$

$$k_{нас} = \frac{I_{1нас1}}{I_{1выт1}} = 1,029. \quad (425)$$

Вторая точка:

$$s_2 = 0,8. \quad (426)$$

$$k_y = 0,836. \quad (427)$$

$$I_{1выт1} = 1043 \text{ А}. \quad (428)$$

$$k_{нас} = 1,08. \quad (429)$$

$$a = 2. \quad (430)$$

$$F_{пср} = 0,7 \cdot \frac{I_{1выт2} \cdot k_{нас} \cdot u_{п}}{a} \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 12350 \text{ А}. \quad (431)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 1,41. \quad (432)$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{нсп}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 0,842 \text{ Тл.} \quad (433)$$

По рисунку 9.61

$$k_{\delta} = 0,98. \quad (434)$$

$$c_{\text{э}1} = (t_{Z1} - b_{\text{п}})(1 - k_{\delta}) = 2,861 \cdot 10^{-4}. \quad (435)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п}1\text{нас}} = \frac{h_k + h_{\text{шт}}}{b_{\text{п}}} \cdot \frac{c_{\text{э}1}}{b_{\text{п}} + c_{\text{э}1}} = 0,031. \quad (436)$$

$$\lambda_{\text{п}1\text{нас}} = \lambda_{\text{п}1} - \Delta\lambda_{\text{п}1\text{нас}} = 2,386. \quad (437)$$

$$\lambda_{\text{д}1\text{нас}} = \lambda_{\text{д}1} \cdot k_{\delta} = 0,278. \quad (438)$$

$$x_{1\text{нас}2} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п}1\text{нас}} + \lambda_{\text{д}1\text{нас}} + \lambda_{\text{л}1}}{\lambda_{\text{п}1} + \lambda_{\text{д}1} + \lambda_{\text{л}1}} = 3,443 \text{ Ом.} \quad (439)$$

$$c_{\text{э}2} = (t_{Z2} - b_{\text{ш}})(1 - k_{\delta}) = 7,076 \cdot 10^{-4}. \quad (440)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п}2\text{нас}} = \frac{h_{\text{ш}2}}{b_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{\text{э}2}}{b_{\text{ш}} + c_{\text{э}2}} = 0,159. \quad (441)$$

$$\lambda_{\text{п}2\text{нас}} = \lambda_{\text{п}2\text{э}2} - \Delta\lambda_{\text{п}2\text{нас}} = 1,463. \quad (442)$$

$$\lambda_{\text{д}2\text{нас}} = \lambda_{\text{д}2} \cdot k_{\delta} = 0,389. \quad (443)$$

$$x_{2\text{нас}2} = x_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п}2\text{нас}} + \lambda_{\text{д}2\text{нас}} + \lambda_{\text{л}2}}{\lambda_{\text{п}2} + \lambda_{\text{д}2} + \lambda_{\text{л}2}} = 1,936 \text{ Ом.} \quad (444)$$

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}2}}{x_{12\text{п}}} = 1,023. \quad (445)$$

$$r_{2\text{э}2} = 0,532. \quad (446)$$

$$x_{2\text{э}2} = 2,026. \quad (447)$$

$$R_{\text{пнас}} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r_{2\text{э}2}}{S_2} = 0,886 \text{ Ом.} \quad (448)$$

$$X_{\text{пнас}} = x_{1\text{нас}2} + c_{1\text{пнас}} \cdot x_{2\text{э}2} = 5,423 \text{ Ом.} \quad (449)$$

$$I_{2\text{нас}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + X_{\text{пнас}}^2}} = 1051 \text{ А.} \quad (450)$$



$$I_{1нас2} = I_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{пнас}^2 + (X_{пнас} + x_{12п})^2}}{C_{1пнас} \cdot x_{12п}} = 1064 \text{ A.} \quad (451)$$

$$I_{п2} = \frac{I_{1нас2}}{I_{1НОМ}} = 5,052. \quad (452)$$

$$M_{п2} = \left(\frac{I_{2нас}}{I_{2НОМ}}\right)^2 K_{R2} \frac{S_{НОМ}}{S_2} = 0,68. \quad (453)$$

$$k_{нас} = \frac{I_{1нас2}}{I_{1ВЫТ2}} = 1,02. \quad (454)$$

Третья точка:

$$s_3 = 0,5. \quad (455)$$

$$k_y = 0,836. \quad (456)$$

$$I_{1ВЫТ3} = 1015 \text{ A.} \quad (457)$$

$$k_{нас} = 1,05. \quad (458)$$

$$a = 2. \quad (459)$$

$$F_{пср} = 0,7 \cdot \frac{I_{1ВЫТ3} \cdot k_{нас} \cdot u_{п}}{a} \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{об1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 11680 \text{ A.} \quad (460)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 1,41. \quad (461)$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{пср} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 0,797 \text{ Тл.} \quad (462)$$

По рисунку 9.61

$$k_{\delta} = 0,98. \quad (463)$$

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{Z1} - b_{п})(1 - k_{\delta}) = 2,861 \cdot 10^{-4}. \quad (464)$$

$$\Delta\lambda_{п1нас} = \frac{h_k + h_{шст}}{b_{п}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{b_{п} + c_{\varepsilon 1}} = 0,031. \quad (465)$$

$$\lambda_{п1нас} = \lambda_{п1} - \Delta\lambda_{п1нас} = 2,386. \quad (466)$$

$$\lambda_{д1нас} = \lambda_{д1} \cdot k_{\delta} = 0,278. \quad (467)$$

$$x_{1нас3} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{п1нас} + \lambda_{д1нас} + \lambda_{л1}}{\lambda_{п1} + \lambda_{д1} + \lambda_{л1}} = 3,443 \text{ Ом.} \quad (468)$$

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{z2} - b_{ш})(1 - k_{\delta}) = 7,076 \cdot 10^{-4}. \quad (469)$$

$$\Delta \lambda_{п2нас} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{b_{ш} + c_{\varepsilon 2}} = 0,159. \quad (470)$$

$$\lambda_{п2\varepsilon нас} = \lambda_{п2\varepsilon 3} - \Delta \lambda_{п2нас} = 1,69. \quad (471)$$

$$\lambda_{д2нас} = \lambda_{д2} \cdot k_{\delta} = 0,389. \quad (472)$$

$$x_{2нас3} = x_2 \cdot \frac{\lambda_{п2\varepsilon нас} + \lambda_{д2нас} + \lambda_{л2}}{\lambda_{п2} + \lambda_{д2} + \lambda_{л2}} = 2,058 \text{ Ом}. \quad (473)$$

$$c_{1пнас} = 1 + \frac{x_{1нас3}}{x_{12п}} = 1,023. \quad (474)$$

$$r_{2\varepsilon 2} = 0,433. \quad (475)$$

$$x_{2\varepsilon 2} = 2,148. \quad (476)$$

$$R_{пнас} = r_1 + c_{1пнас} \cdot \frac{r_{2\varepsilon 3}}{s_3} = 1,092 \text{ Ом}. \quad (477)$$

$$X_{пнас} = x_{1нас3} + c_{1пнас} \cdot x_{2\varepsilon нас3} = 5,548 \text{ Ом}. \quad (478)$$

$$I_{2нас} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{пнас}^2 + X_{пнас}^2}} = 1021 \text{ А}. \quad (479)$$

$$I_{1нас3} = I_{2нас} \cdot \frac{\sqrt{R_{пнас}^2 + (X_{пнас} + x_{12п})^2}}{c_{1пнас} \cdot x_{12п}} = 1035 \text{ А}. \quad (480)$$

$$I_{п2} = \frac{I_{1нас3}}{I_{1ном}} = 5,052. \quad (481)$$

$$M_{п3} = \left( \frac{I_{2нас}}{I_{2ном}} \right)^2 K_{R3} \frac{S_{ном}}{s_3} = 0,68. \quad (482)$$

$$k_{нас} = \frac{I_{1нас3}}{I_{1выт3}} = 1,02. \quad (483)$$

Четвертая точка:

$$s_4 = 0,2. \quad (484)$$

$$k_y = 0,836. \quad (485)$$

$$I_{1выт4} = 945,898 \text{ А}. \quad (486)$$

$$k_{нас} = 1,02. \quad (487)$$

$$a = 2. \quad (488)$$

$$F_{\text{нсп}} = 0,7 \cdot \frac{I_{1\text{выгт4}} \cdot k_{\text{нас}} \cdot u_{\text{п}}}{a} \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{\text{о61}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 10570 \text{ А.} \quad (489)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 1,41. \quad (490)$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{нсп}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 0,721 \text{ Тл.} \quad (491)$$

По рисунку 9.61

$$k_{\delta} = 0,985. \quad (492)$$

$$c_{\text{э1}} = (t_{Z1} - b_{\text{п}})(1 - k_{\delta}) = 2,146 \cdot 10^{-4}. \quad (493)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п1нас}} = \frac{h_k + h_{\text{шт}}}{b_{\text{п}}} \cdot \frac{c_{\text{э1}}}{b_{\text{п}} + c_{\text{э1}}} = 0,023. \quad (494)$$

$$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1нас}} = 2,393. \quad (495)$$

$$\lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot k_{\delta} = 0,28. \quad (496)$$

$$x_{1\text{нас4}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}} = 3,449 \text{ Ом.} \quad (497)$$

$$c_{\text{э2}} = (t_{Z2} - b_{\text{ш}})(1 - k_{\delta}) = 5,307 \cdot 10^{-4}. \quad (498)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{\text{э2}}}{b_{\text{ш}} + c_{\text{э2}}} = 0,125. \quad (499)$$

$$\lambda_{\text{п2нас}} = \lambda_{\text{п2}} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 2,295. \quad (500)$$

$$\lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} \cdot k_{\delta} = 0,391. \quad (501)$$

$$x_{2\text{нас4}} = x_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п2нас}} + \lambda_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}} = 2,385 \text{ Ом.} \quad (502)$$

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас4}}}{x_{12\text{п}}} = 1,023. \quad (503)$$

$$r_{2\varepsilon4} = 0,532. \quad (504)$$

$$x_{2\varepsilon4} = 2,026. \quad (505)$$

$$R_{\text{пнас}} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r_{2\varepsilon4}}{S_4} = 1,655 \text{ Ом.} \quad (506)$$

$$X_{\text{пнас}} = x_{1\text{нас4}} + c_{1\text{пнас}} \cdot x_{2\varepsilon4} = 5,888 \text{ Ом.} \quad (507)$$

$$I_{2\text{нас}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + X_{\text{пнас}}^2}} = 943,969 \text{ А.} \quad (508)$$

$$I_{1\text{нас4}} = I_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + (X_{\text{пнас}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{пнас}} \cdot x_{12\text{п}}} = 958,932 \text{ А.} \quad (509)$$

$$I_{\text{п4}} = \frac{I_{1\text{нас4}}}{I_{1\text{ном}}} = 4,552. \quad (510)$$

$$M_{\text{п4}} = \left( \frac{I_{2\text{нас}}}{I_{2\text{ном}}} \right)^2 K_{R4} \frac{S_{\text{ном}}}{S_4} = 1,168. \quad (511)$$

$$k_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас4}}}{I_{1\text{выт4}}} = 1,014. \quad (512)$$

Пятая точка:

$$s_5 = 0,1. \quad (513)$$

$$k_y = 0,836. \quad (514)$$

$$I_{1\text{выт5}} = 890,753 \text{ А.} \quad (515)$$

$$k_{\text{нас}} = 1. \quad (516)$$

$$a = 2 \quad (517)$$

$$F_{\text{пср}} = 0,7 \cdot \frac{I_{1\text{выт5}} \cdot k_{\text{нас}} \cdot u_{\text{п}}}{a} \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 9761 \text{ А.} \quad (518)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 1,41. \quad (519)$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{пср}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 0,666 \text{ Тл.} \quad (520)$$

По рисунку 9.61

$$k_{\delta} = 0,985. \quad (521)$$

$$c_{\text{э1}} = (t_{Z1} - b_{\text{п}})(1 - k_{\delta}) = 2,146 \cdot 10^{-4}. \quad (522)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п1нас}} = \frac{h_k + h_{\text{шт}}}{b_{\text{п}}} \cdot \frac{c_{\text{э1}}}{b_{\text{п}} + c_{\text{э1}}} = 0,023. \quad (523)$$

$$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1нас}} = 2,393. \quad (524)$$

$$\lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot k_{\delta} = 0,28. \quad (525)$$

$$x_{1\text{нас}4} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п}1\text{нас}} + \lambda_{\text{д}1\text{нас}} + \lambda_{\text{л}1}}{\lambda_{\text{п}1} + \lambda_{\text{д}1} + \lambda_{\text{л}1}} = 3,449 \text{ Ом.} \quad (526)$$

$$c_{\text{э}2} = (t_{\text{Z}2} - b_{\text{ш}})(1 - k_{\delta}) = 5,307 \cdot 10^{-4}. \quad (527)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п}2\text{нас}} = \frac{h_{\text{ш}2}}{b_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{\text{э}2}}{b_{\text{ш}} + c_{\text{э}2}} = 0,125. \quad (528)$$

$$\lambda_{\text{п}2\text{энас}} = \lambda_{\text{п}2\text{э}5} - \Delta\lambda_{\text{п}2\text{нас}} = 2,613. \quad (529)$$

$$\lambda_{\text{д}2\text{нас}} = \lambda_{\text{д}2} \cdot k_{\delta} = 0,391. \quad (530)$$

$$x_{2\text{нас}5} = x_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п}2\text{энас}} + \lambda_{\text{д}2\text{нас}} + \lambda_{\text{л}2}}{\lambda_{\text{п}2} + \lambda_{\text{д}2} + \lambda_{\text{л}2}} = 2,556 \text{ Ом.} \quad (531)$$

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас}5}}{x_{12\text{п}}} = 1,023. \quad (532)$$

$$r_{2\text{э}5} = 0,212. \quad (533)$$

$$x_{2\text{э}5} = 2,627. \quad (534)$$

$$R_{\text{пнас}} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r_{2\text{э}5}}{s_5} = 2,372 \text{ Ом.} \quad (535)$$

$$X_{\text{пнас}} = x_{1\text{нас}5} + c_{1\text{пнас}} \cdot x_{2\text{энас}5} = 6,063 \text{ Ом.} \quad (536)$$

$$I_{2\text{нас}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + X_{\text{пнас}}^2}} = 886,77 \text{ А.} \quad (537)$$

$$I_{1\text{нас}5} = I_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + (X_{\text{пнас}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{пнас}} \cdot x_{12\text{п}}} = 901,884 \text{ А.} \quad (538)$$

$$I_{\text{п}5} = \frac{I_{1\text{нас}5}}{I_{1\text{ном}}} = 4,281. \quad (539)$$

$$M_{\text{п}5} = \left(\frac{I_{2\text{нас}}}{I_{2\text{ном}}}\right)^2 K_{R5} \frac{S_{\text{ном}}}{s_5} = 1,542. \quad (540)$$

$$k_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас}5}}{I_{1\text{выт}5}} = 1,012. \quad (541)$$

Шестая точка:

$$s_6 = 0,037. \quad (542)$$

$$k_y = 0,836. \quad (543)$$

$$I_{1\text{ВЫТ6}} = 594,635 \text{ А.} \quad (544)$$

$$k_{\text{нас}} = 1. \quad (545)$$

$$a = 2. \quad (546)$$

$$F_{\text{пср}} = 0,7 \cdot \frac{I_{1\text{ВЫТ6}} \cdot k_{\text{нас}} \cdot u_{\text{п}}}{a} \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{\text{об1}} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 6516 \text{ А.} \quad (547)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 1,41. \quad (548)$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{пср}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 0,444 \text{ Тл.} \quad (549)$$

По рисунку 9.61

$$k_{\delta} = 0,99. \quad (550)$$

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{Z1} - b_{\text{п}})(1 - k_{\delta}) = 1,431 \cdot 10^{-4}. \quad (551)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п1нас}} = \frac{h_k + h_{\text{шт}}}{b_{\text{п}}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 1}}{b_{\text{п}} + c_{\varepsilon 1}} = 0,016. \quad (552)$$

$$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1нас}} = 2,401. \quad (553)$$

$$\lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot k_{\delta} = 0,281. \quad (554)$$

$$x_{1\text{нас6}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}} = 3,455 \text{ Ом.} \quad (555)$$

$$c_{\varepsilon 2} = (t_{Z2} - b_{\text{ш}})(1 - k_{\delta}) = 3,538 \cdot 10^{-4} \quad (556)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = \frac{h_{\text{шт2}}}{b_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{\varepsilon 2}}{b_{\text{ш}} + c_{\varepsilon 2}} = 0,088. \quad (557)$$

$$\lambda_{\text{п2нас}} = \lambda_{\text{п2}} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 2,756. \quad (558)$$

$$\lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} \cdot k_{\delta} = 0,393. \quad (559)$$

$$x_{2\text{нас6}} = x_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п2нас}} + \lambda_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}} = 2,634 \text{ Ом.} \quad (560)$$

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас6}}}{x_{12\text{п}}} = 1,023. \quad (561)$$

$$r_{2\varepsilon 5} = 0,214. \quad (562)$$

$$x_{2\varepsilon 5} = 2,684. \quad (563)$$

$$R_{\text{пнас}} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r_{2\varepsilon 6}}{S_6} = 6,181 \text{ Ом.} \quad (564)$$

$$X_{\text{пнас}} = x_{1\text{нас}6} + c_{1\text{пнас}} \cdot x_{2\varepsilon\text{нас}6} = 6,149 \text{ Ом.} \quad (565)$$

$$I_{2\text{нас}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + X_{\text{пнас}}^2}} = 662,177 \text{ А.} \quad (566)$$

$$I_{1\text{нас}6} = I_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + (X_{\text{пнас}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{пнас}} \cdot x_{12\text{п}}} = 674,25 \text{ А.} \quad (567)$$

$$I_{\text{п}6} = \frac{I_{1\text{нас}6}}{I_{1\text{ном}}} = 3,201. \quad (568)$$

$$M_{\text{п}6} = \left(\frac{I_{2\text{нас}}}{I_{2\text{ном}}}\right)^2 K_{R6} \frac{S_{\text{ном}}}{S_6} = 2,371. \quad (569)$$

$$k_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас}6}}{I_{1\text{выт}6}} = 1,134. \quad (570)$$

Седьмая точка:

$$s_7 = 0,35. \quad (571)$$

$$k_y = 0,836. \quad (572)$$

$$I_{1\text{выт}7} = 994,98 \text{ А.} \quad (573)$$

$$k_{\text{нас}} = 1,04. \quad (574)$$

$$a = 2. \quad (575)$$

$$F_{\text{пср}} = 0,7 \cdot \frac{I_{1\text{выт}7} \cdot k_{\text{нас}} \cdot u_{\text{п}}}{a} \left( k_{\beta} + k_y \cdot k_{\text{об}1} \cdot \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 11340 \text{ А.} \quad (576)$$

$$C_N = 0,64 + 2,5 \cdot \sqrt{\frac{\delta}{t_{Z1} + t_{Z2}}} = 1,41. \quad (577)$$

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{\text{пср}} \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot \delta \cdot C_N} = 0,773 \text{ Тл.} \quad (578)$$

По рисунку 9.61

$$k_{\delta} = 0,972. \quad (579)$$

$$c_{\varepsilon 1} = (t_{Z1} - b_{\text{п}})(1 - k_{\delta}) = 4,006 \cdot 10^{-4}. \quad (580)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п1нас}} = \frac{h_k + h_{\text{шст}}}{b_{\text{п}}} \cdot \frac{c_{\text{э1}}}{b_{\text{п}} + c_{\text{э1}}} = 0,043. \quad (581)$$

$$\lambda_{\text{п1нас}} = \lambda_{\text{п1}} - \Delta\lambda_{\text{п1нас}} = 2,374. \quad (582)$$

$$\lambda_{\text{д1нас}} = \lambda_{\text{д1}} \cdot k_{\delta} = 0,276. \quad (583)$$

$$x_{1\text{нас7}} = x_1 \cdot \frac{\lambda_{\text{п1нас}} + \lambda_{\text{д1нас}} + \lambda_{\text{л1}}}{\lambda_{\text{п1}} + \lambda_{\text{д1}} + \lambda_{\text{л1}}} = 3,434 \text{ Ом}. \quad (584)$$

$$c_{\text{э2}} = (t_{z2} - b_{\text{ш}})(1 - k_{\delta}) = 9,907 \cdot 10^{-4}. \quad (585)$$

$$\Delta\lambda_{\text{п2нас}} = \frac{h_{\text{ш2}}}{b_{\text{ш}}} \cdot \frac{c_{\text{э2}}}{b_{\text{ш}} + c_{\text{э2}}} = 0,207. \quad (586)$$

$$\lambda_{\text{п2нас}} = \lambda_{\text{п2}} - \Delta\lambda_{\text{п2нас}} = 1,791. \quad (587)$$

$$\lambda_{\text{д2нас}} = \lambda_{\text{д2}} \cdot k_{\delta} = 0,386. \quad (588)$$

$$x_{2\text{нас7}} = x_2 \cdot \frac{\lambda_{\text{п2нас}} + \lambda_{\text{д2нас}} + \lambda_{\text{л2}}}{\lambda_{\text{п2}} + \lambda_{\text{д2}} + \lambda_{\text{л2}}} = 2,11 \text{ Ом}. \quad (589)$$

$$c_{1\text{пнас}} = 1 + \frac{x_{1\text{нас7}}}{x_{12\text{п}}} = 1,023. \quad (590)$$

$$r_{2\text{э5}} = 0,371. \quad (591)$$

$$x_{2\text{э5}} = 2,228. \quad (592)$$

$$R_{\text{пнас}} = r_1 + c_{1\text{пнас}} \cdot \frac{r_{2\text{э7}}}{s_7} = 1,29 \text{ Ом}. \quad (593)$$

$$X_{\text{пнас}} = x_{1\text{нас7}} + c_{1\text{пнас}} \cdot x_{2\text{энас7}} = 5,592 \text{ Ом}. \quad (594)$$

$$I_{2\text{нас}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + X_{\text{пнас}}^2}} = 1006 \text{ А}. \quad (595)$$

$$I_{1\text{нас7}} = I_{2\text{нас}} \cdot \frac{\sqrt{R_{\text{пнас}}^2 + (X_{\text{пнас}} + x_{12\text{п}})^2}}{c_{1\text{пнас}} \cdot x_{12\text{п}}} = 1020 \text{ А}. \quad (596)$$

$$I_{\text{п7}} = \frac{I_{1\text{нас7}}}{I_{1\text{ном}}} = 4,843. \quad (597)$$

$$M_{\text{п7}} = \left(\frac{I_{2\text{нас}}}{I_{2\text{ном}}}\right)^2 K_{R7} \frac{s_{\text{ном}}}{s_7} = 0,994. \quad (598)$$

$$k_{\text{нас}} = \frac{I_{1\text{нас7}}}{I_{1\text{выт7}}} = 1,025. \quad (599)$$



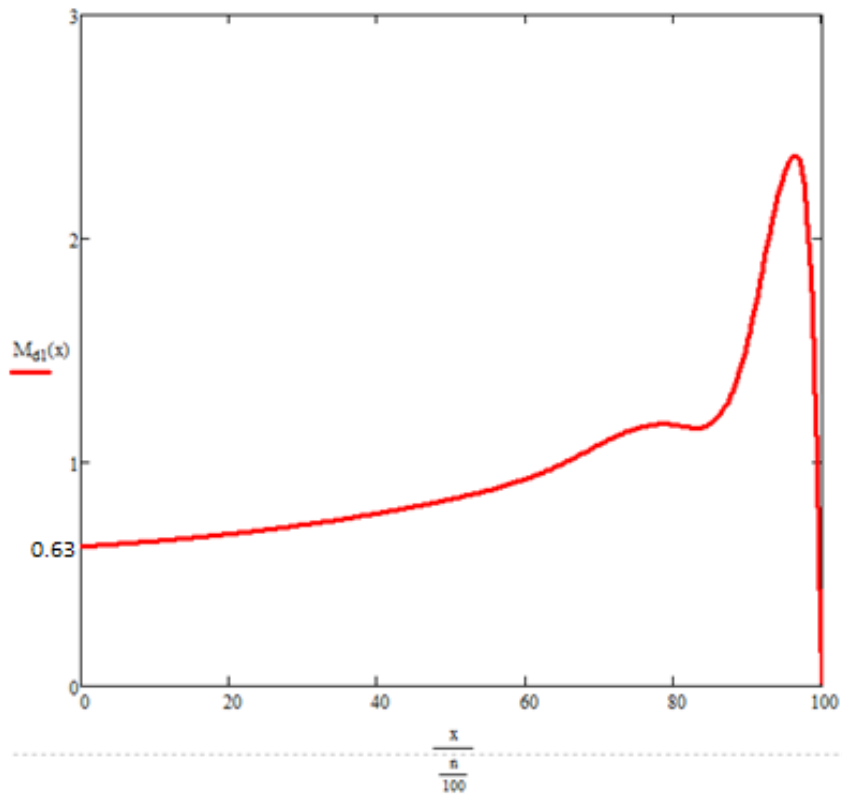


Рисунок 8 – График пускового момента

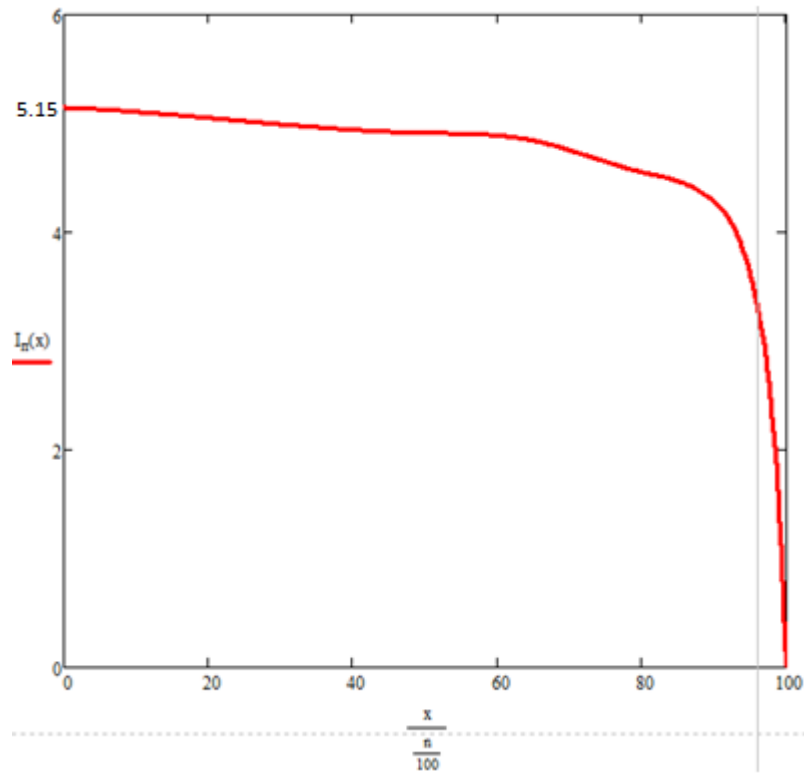


Рисунок 9 – График пускового тока

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Из графиков пусковых тока и момента можно сделать вывод о том, что требования технического задания по кратности пусковых тока и момента выполнено.

В ходе проектирования решалась задача обеспечения разгона электродвигателя при прямом пуске от сети под нагрузкой за время, равное не более 10 секундам, при просадке напряжения до 0,75 от номинального.

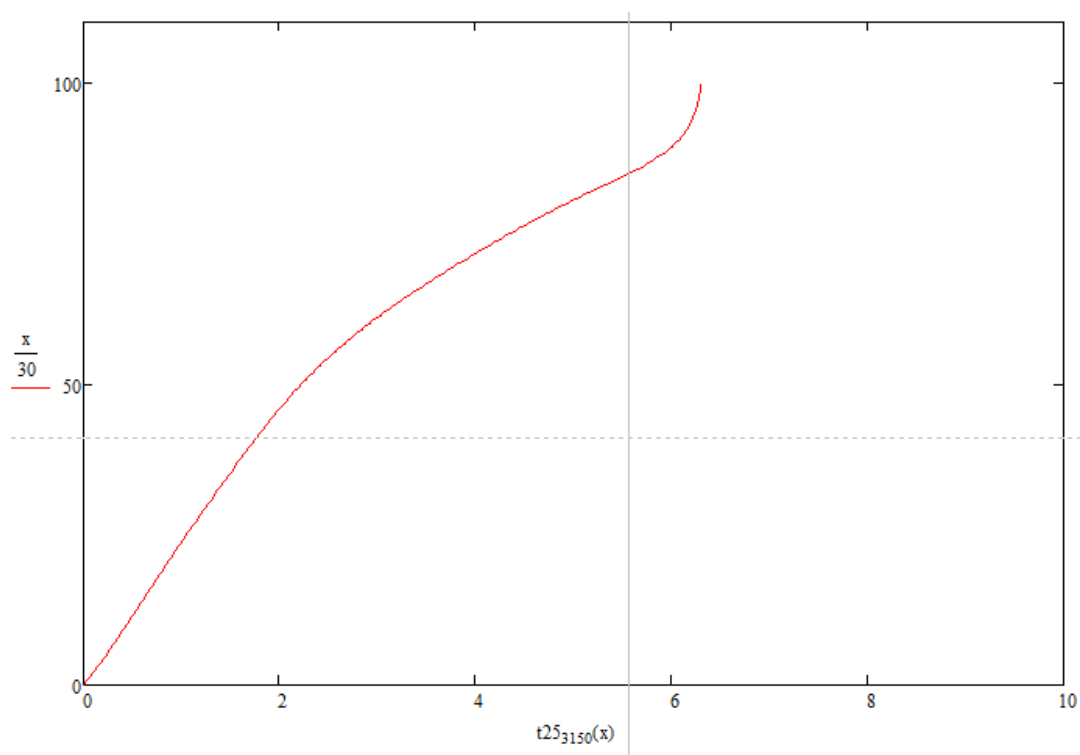


Рисунок 10 – График разгона двигателя

Из рисунка 10 видно, что электродвигатель разгоняется до номинальной частоты вращения не более чем за 7 секунд, то есть требование технического задания выполнено.

### 3 МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ПРОГРАММЕ ANSYS MAXWELL

С целью проверки и, при необходимости, корректировки принятых в предыдущем разделе решений была построена модель проектируемого двигателя. Для построения математической модели двигателя был использован метод конечных элементов, позволяющий наиболее точно описать электромагнитное поле электрической машины.

Для построения конечно-элементной модели использовался пакет программ *ANSYS Maxwell*.

Для построения геометрической модели электромагнитной части двигателя и задания основных электромагнитных нагрузок использовался модуль *RMxprt*, существенно упрощающий указанные процедуры.

Далее настроенная модель электрической машины передавалась в модули полевого анализа программы *ANSYS Maxwell*.

Математический аппарат программы основан на методе конечных элементов, позволяющем найти точное решение системы уравнений Максвелла:

$$\operatorname{rot} H = J; \quad (600)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{dB}{dt}; \quad (601)$$

$$\operatorname{div} B = 0; \quad (602)$$

$$\operatorname{div} D = \rho. \quad (603)$$

Система дополняется уравнениями связи:

$$B = \mu H, D = \varepsilon E, J_{\text{пр}} = \gamma E. \quad (604)$$

В записанных уравнениях  $H$  - напряженность магнитного поля,  $B$  - магнитная индукция,  $E$  - напряженность электрического поля,  $J$  - полная плотность тока,  $D$  - электрическое смещение,  $\rho$  - объемная плотность электрического заряда,  $m$  - абсолютная магнитная проницаемость среды,  $\gamma$  - удельная электрическая

проводимость среды,  $\varepsilon$  - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды,  $J_{\text{пр}}$  - плотность тока проводимости.

В частных случаях, имеющих место в электрических машинах, записанная система уравнений упрощается. В наиболее общем случае переменного во времени электромагнитного поля система уравнений Максвелла записывается в следующем виде:

$$\text{rot } H = J; \quad (605)$$

$$\text{rot } E = -\frac{dB}{dt}; \quad (606)$$

$$\text{div } B = 0; \quad (607)$$

$$B = \mu H; \quad (608)$$

$$J_{\text{пр}} = \gamma E; \quad (609)$$

$$J = J_{\text{пр}} + J_{\text{ст}}, \quad (610)$$

где  $J_{\text{ст}}$  - сторонний ток, являющийся причиной возникновения поля.

Расчет электромагнитного поля заключается в определении его количественных оценок: напряженности электрического поля, напряженности магнитного поля, индукции магнитного поля. Численное решение системы уравнений Максвелла становится возможным при переходе к вспомогательным функциям - скалярному и векторному магнитным потенциалам. При этом задача сводится к решению известными методами дифференциальных уравнений стандартного вида - уравнений Лапласа или уравнений Пуассона.

Связь напряженности магнитного поля со скалярным магнитным потенциалом описывается уравнением:

$$H = -\text{grad } \varphi_M. \quad (611)$$

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		54

Уравнение Лапласа относительно скалярного магнитного потенциала записывается в виде:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} \varphi_M = 0. \quad (612)$$

Связь индукции магнитного поля с векторным магнитным потенциалом имеет вид:

$$\operatorname{rot} A = B. \quad (613)$$

Значения векторного магнитного потенциала могут быть найдены из уравнения Пуассона:

$$\operatorname{div} \operatorname{grad} A = -\mu J_{\text{ст}}. \quad (614)$$

Скалярный и векторный потенциал являются функциями геометрических координат и могут быть найдены при заданной геометрии расчетной области, источниках поля и граничных условий на линиях или поверхностях раздела сред.

В настоящее время существует множество программных решений для нахождения решений уравнений Лапласа и Пуассона, существенно упрощающих задачу расчета. Одним из передовых решений, предназначенным для решения полевых задач методом конечных элементов применительно к электрическим машинам, является программный комплекс *ANSYS Electronics Desktop* и входящий в него модуль *ANSYS Maxwell*, использованный нами для моделирования электромагнитных процессов в рассматриваемой электрической машине.

Для решения полевой задачи задавались граничные условия (в нашем случае – это равенство нулю векторного магнитного потенциала на границе расчетной области и условия непрерывности магнитных линий на границах раздела сред внутри расчетной области), тип и характер возбуждения обмоток электрической машины (для стартера к выводам обмотки подключалась модель полупроводникового коммутатора, обеспечивающего переключение секций двигателя в зависимости от угла поворота ротора; для генератора к выводам обмотки подключалась модель с активной нагрузкой на выходе). Задача решалась

относительно векторного магнитного потенциала, что позволило рассчитывать поле в областях, содержащих токи.

Для получения более точного результата проектирования была создана модель электродвигателя и получено решение моделирования:

Внешний вид модели двигателя в разрезе представлен на рисунке 11.

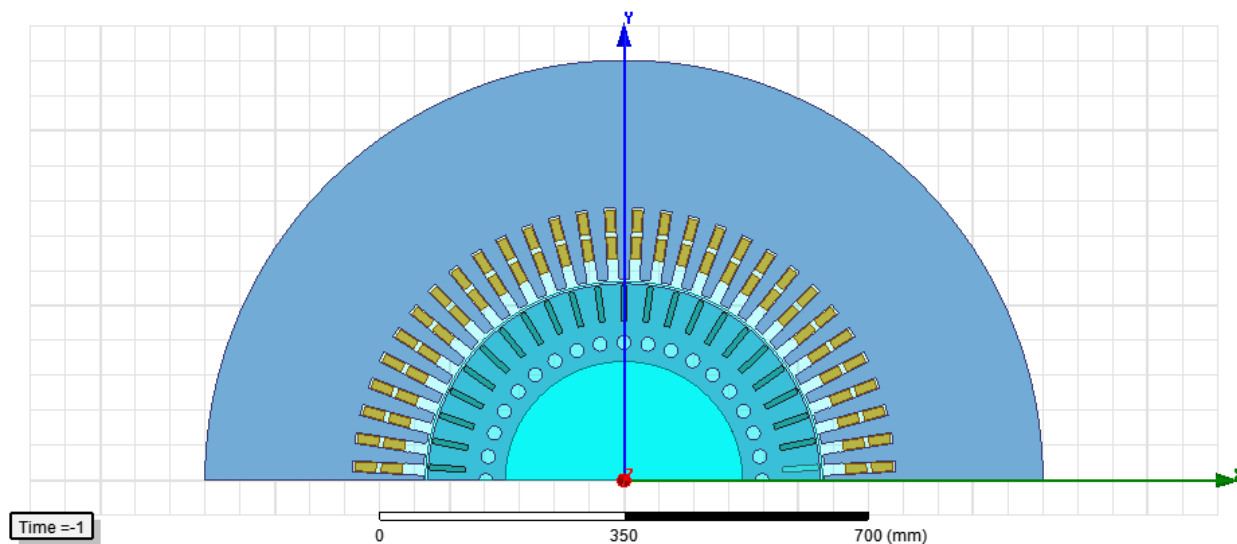


Рисунок 11 – Модель двигателя в формате 2d в пакете *Ansys Maxwell*

На рисунках 12-17 представлены результаты моделирования.

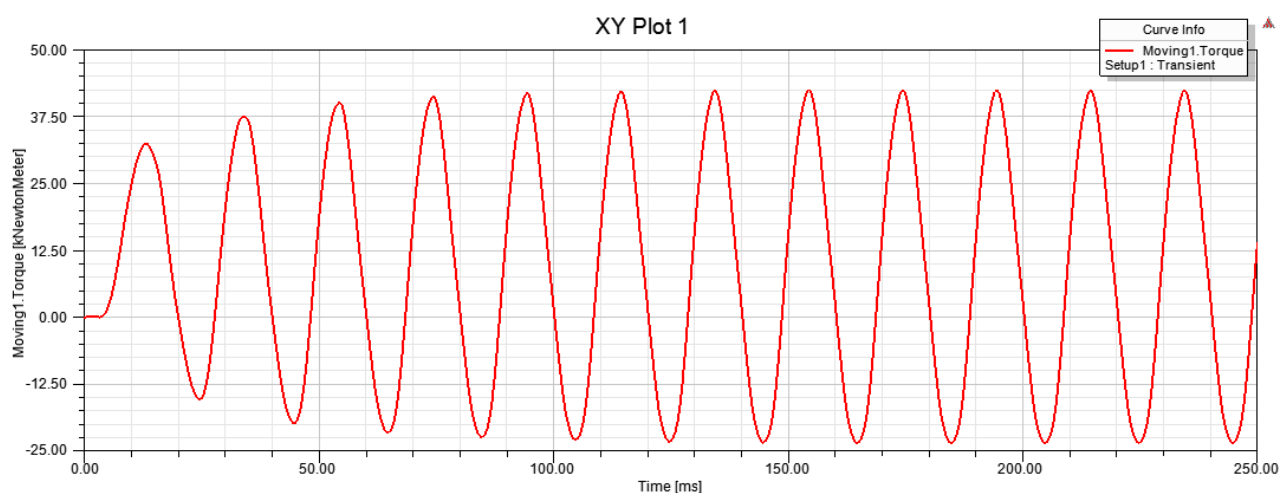


Рисунок 12 – График момента в пусковом режиме работы двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

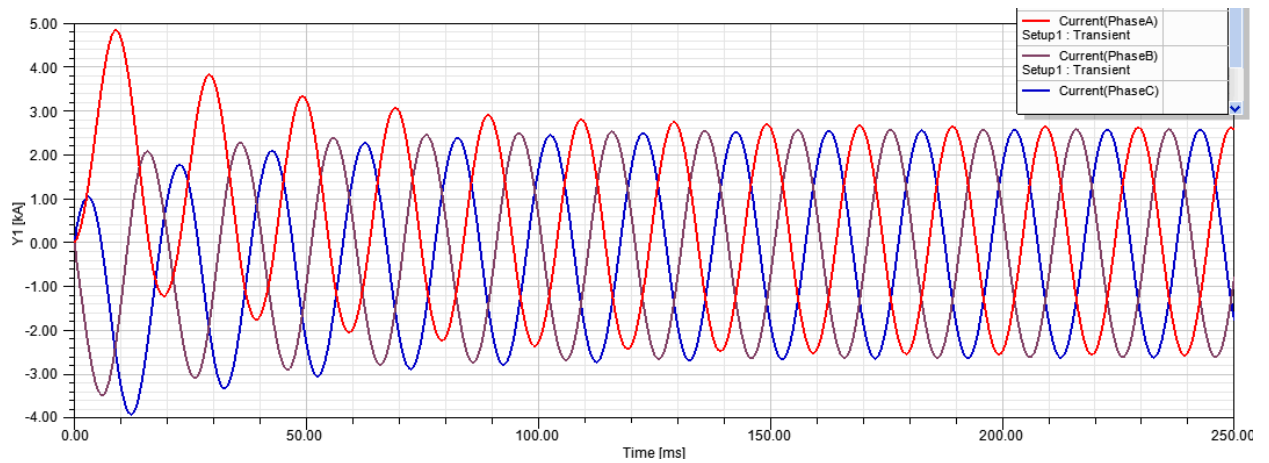


Рисунок 13 – График тока в пусковом режиме работы двигателя  
XY Plot 1

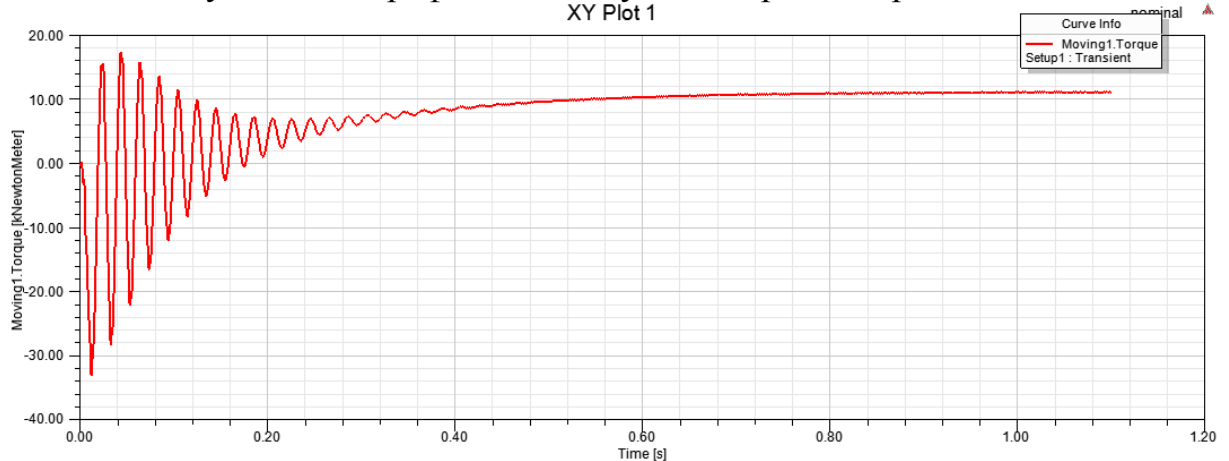


Рисунок 14 – График момента в номинальном режиме работы двигателя

На рисунке 14 видно значение момента двигателя в номинальном режиме, он равен 11000 Нм.

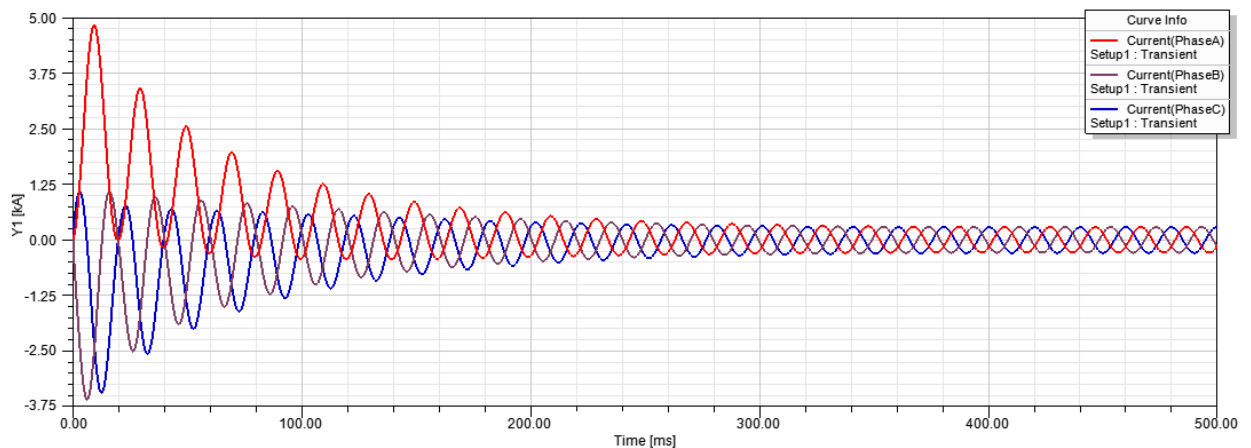


Рисунок 15 – График тока в номинальном режиме работы двигателя

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

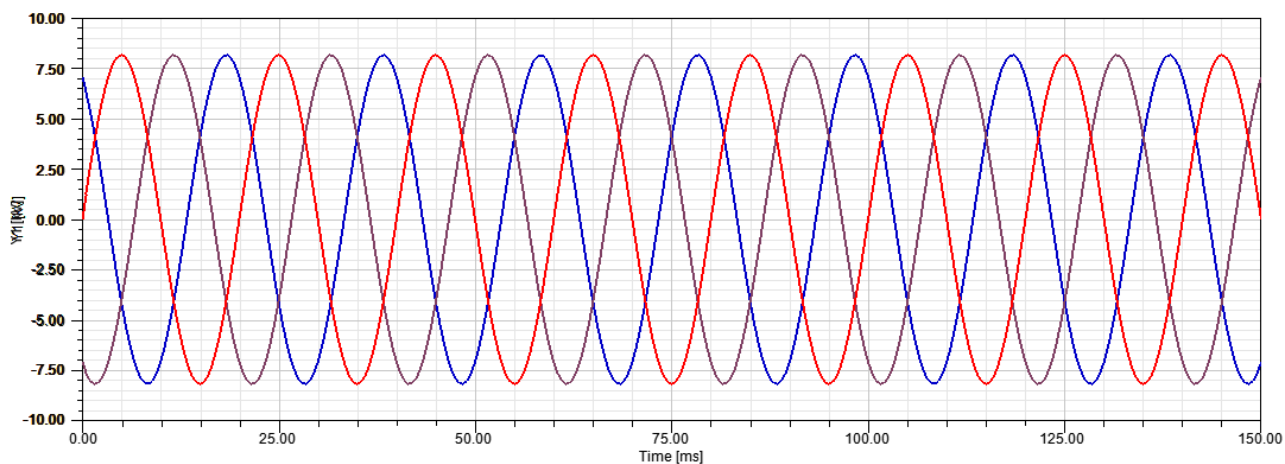


Рисунок 16 – График напряжения в номинальном режиме работы двигателя

Из рисунка 16 видно действующее значение напряжения в фазах, равное 8150 В.

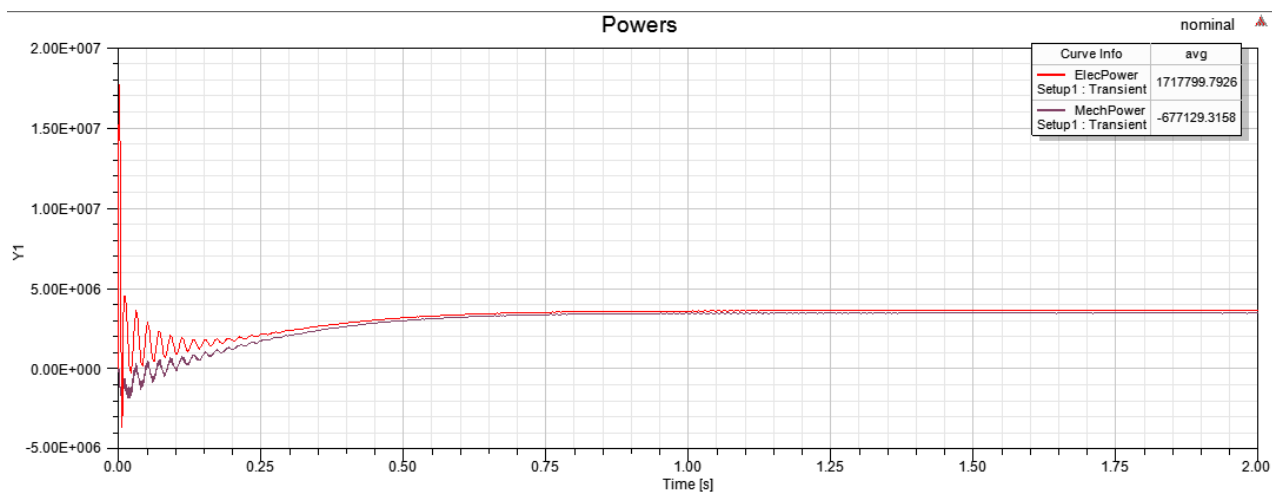


Рисунок 17 – График мощности в номинальном режиме работы двигателя

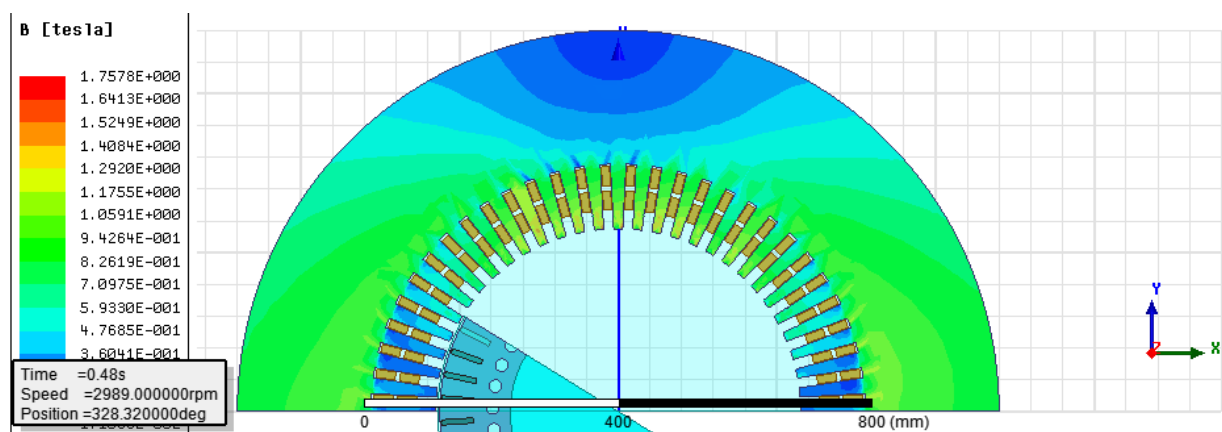


Рисунок 18 – Картина поля двигателя

Картина поля показывает, что индукция в статоре находится в допустимых пределах.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата



#### 4 МОДЕЛИРОВАНИЕ В *MATLAB*

Для моделирования в программе *MATLAB* необходимо было произвести настройку модели электропривода. Для этой цели были посчитаны параметры:

Активная мощность, потребляемая преобразователем частоты в номинальном режиме работы:

$$P_{\text{ПЧ.Н}} = \frac{P_{\text{АД.Н}}}{\eta_{\text{АД.Н}} \cdot \eta_{\text{НВ.Н}} \cdot \eta_{\text{АИН.Н}}} = 3448 \text{ кВт.} \quad (615)$$

Полная номинальная мощность, потребляемая преобразователем частоты в номинальном режиме работы:

$$S_{\text{ПЧ.Н}} = \frac{P_{\text{ПЧ.Н}}}{\chi_{\text{Н}}} = 4310 \text{ кВт.} \quad (616)$$

Индуктивность трехфазного реактора на входе преобразователя частоты:

$$L_{\text{Р}} = \frac{X_{\text{Р\%}}}{100} \cdot \frac{U_{\text{Ф.Н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{С}} \cdot I_{1.Н}} = 6,7 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.} \quad (617)$$

Активное сопротивление трехфазного реактора на входе преобразователя частоты:

$$R_{\text{Р}} = \frac{U_{\text{Р.Р}}}{I_{1.Н}} = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Ом.} \quad (618)$$

Емкость конденсатора фильтра для низкого класса напряжения:

$$C_{d1} = C_{\text{уд}} \cdot P_{\text{АД.Н}} = 567000 \text{ мкФ.} \quad (619)$$

Найденное значение емкости подходит для низкого класса напряжения.

Емкость конденсатора фильтра для высокого класса напряжения находим из формулы равенства энергий:

$$C_{d2} = \frac{C_{d1} \cdot U_{d1}^2}{U_{d2}^2} = 818 \text{ мкФ.} \quad (620)$$

Максимальная мощность торможения в звене постоянного тока преобразователя частоты:

$$P_{\text{Т.д.маx}} = P_{\text{Т.в.маx}} \cdot \eta_{\text{АД.Н}} \cdot \eta_{\text{АИН.Н}} = 5863892 \text{ Вт.} \quad (621)$$

Максимально-допустимое значение тормозного сопротивления в звене постоянного тока преобразователя частоты:

$$R_{T.max} = \frac{U_{d.max}^2}{P_{T.d.max}} = 0,096 \text{ Ом.} \quad (621)$$

Для проверки работы системы ПЧ-АД в программе *MATLAB* была разработана модель этой системы, представленная на рисунке 19. На рисунке 20 представлено решение.

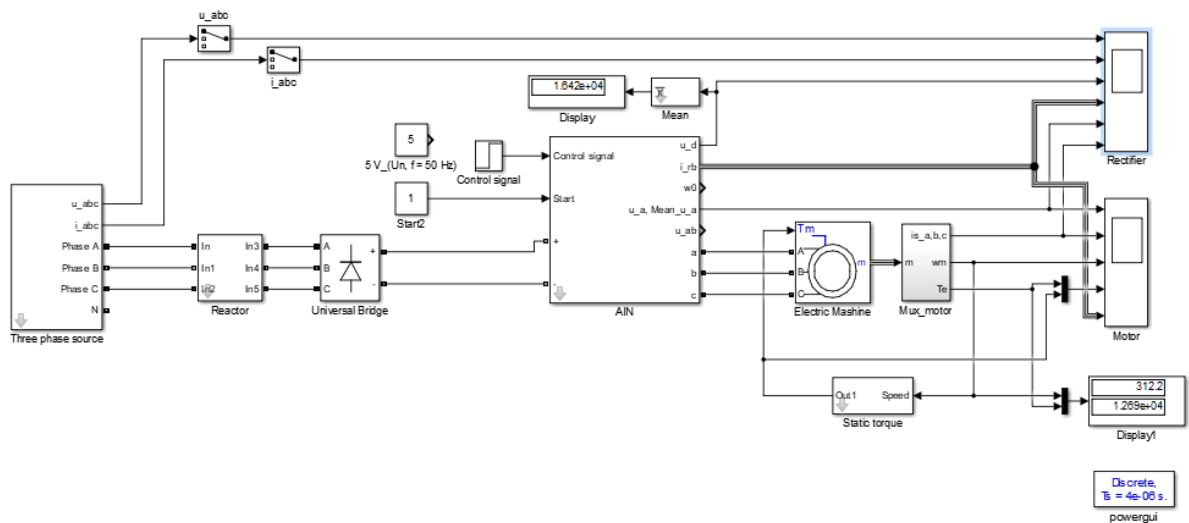


Рисунок 19 – Модель системы ПЧ-АД в программе *MATLAB*

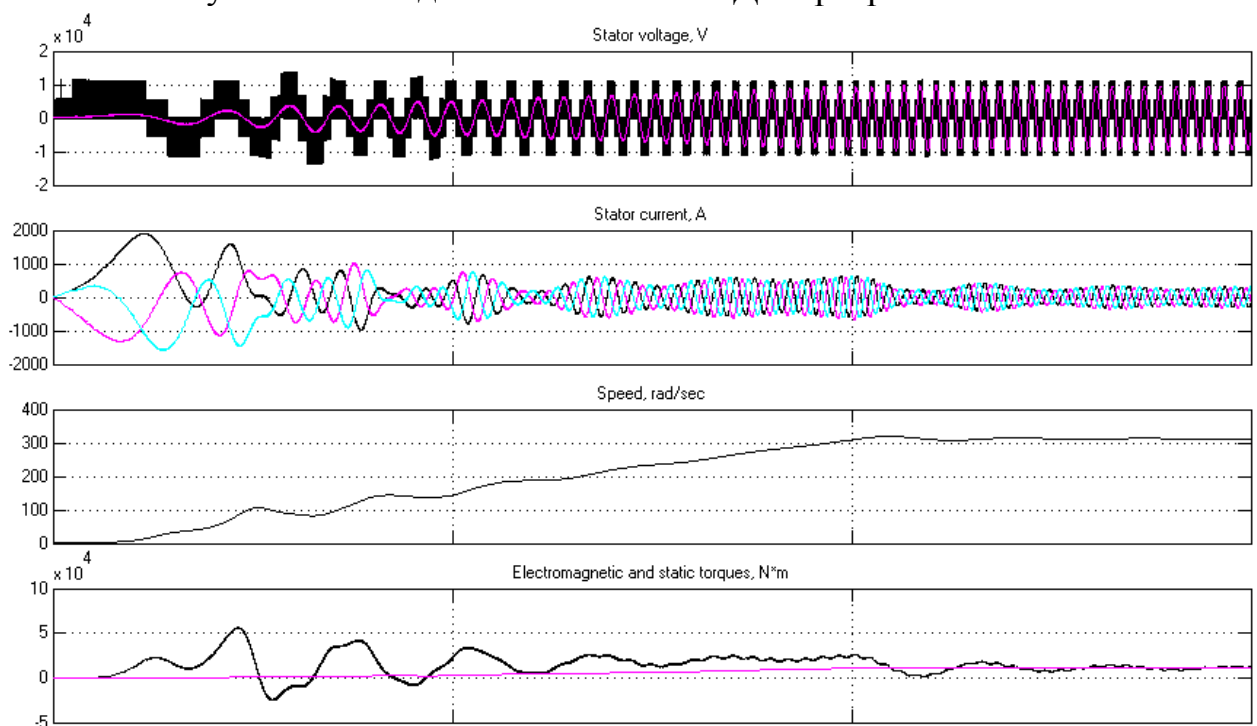


Рисунок 20 – Результат моделирования в программе *MATLAB*

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная выпускная квалификационная работа посвящена разработке взрывозащищенного асинхронного двигателя, работающего в составе регулируемого электропривода.

Мною были проведены следующие этапы исследования:

1. Разработан взрывозащищенный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Произведен электромагнитный расчет. Получены пусковые и рабочие характеристики. Получен график разгона электродвигателя.
2. Составлена модель двигателя в программе *Ansys Maxwell*, получено решение моделирования.
3. Разработана система управления электродвигателем, составлена модель системы ПЧ-АД в программе *MATLAB*. Получен результат моделирования.

Цель, поставленная при выполнении работы, выполнена.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		61

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Антонов М.В. Технология производства электрических машин.– М.: Энергоатомиздат, 1993.– 592 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины: учебник для вузов / А.И. Вольдек. – Л.:Энергия, 1978. – 832 с.
3. М.В. Гельман. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский.– Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 424 с.
4. Гольдберг О.Д., Гурин Я.С., Свиреденко И.С. Проектирование электрических машин/ Под ред. О.Д. Гольдберга, 2-е изд., перераб. и доп.– М.: Высш.шк., 2001.– 430с.
5. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: учебное пособие для вузов / И.П. Копылов. – М.: Энергия, 1980. – 496 с.
6. Пешков И.Б. Обмоточные провода.– М.: Энергоатомиздат, 1995.– 416с.
7. Справочник по электрическим машинам: В 2 т./ Под общей редакцией И.П. Копылова, Б.К. Клокова.– М.: Энергоатомиздат, 1988, 1989.1 т. 456с., 2 т. 668 с.

					<i>ЮУрГУ-13.04.02.2019.157.01 ПЗ ВКР</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		62