

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Институт энергетики и электротехники

Кафедра «Электроснабжение и электротехника»

13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(код и наименование направления подготовки, специальности)

Электромеханика  
(направленность (профиль))

## БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему «Проектирование асинхронного электродвигателя серии 4А про-  
мышленного производства»

Студент(ка)

П.С. Махнев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

Ю.П. Петунин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Консультанты

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

**Допустить к защите**

Заведующий кафедрой д.т.н., профессор В.В. Вахнина \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

Тольятти 2016

## Аннотация

Целью настоящей бакалаврской работы является спроектировать модель асинхронного двигателя серии 4А промышленного производства. В бакалаврской работе проведены расчеты основных размеров двигателя, определены параметры обмоток статора и ротора, рассчитана магнитная цепь данного двигателя, проведен расчет режимов номинального тока и холостого хода, определены тепловые, вентиляционные параметры и масса двигателя. Рассчитаны и построены рабочие характеристики двигателя. Рассмотрены вопросы экологичности и безопасности бакалаврской работы.

Бакалаврская работа представлена пояснительной запиской на 43 листах и приложениями, состоящими из 6 листов А1 с прилагающимися спецификациями и перечнем элементов.

## Содержание

Введение	4
1 Электромагнитные расчеты	7
1.1 Основные параметры	7
1.2 Определение параметров обмотки статора	8
1.3 Определение параметров обмотки ротора	12
1.4 Расчет магнитной цепи	14
1.5 Активное и индуктивное сопротивление обмоток	16
1.6 Расчет режимов номинального тока и холостого хода	21
1.7 Расчет рабочих характеристик	25
1.8 Расчет максимального момента	26
1.9 Пусковой ток и момент	28
1.10 Расчет тепловых и вентиляционных параметров	31
1.11 Масса всего двигателя и расчет динамического момента	34
2 Технология сборки асинхронного двигателя	36
3 Анализ себестоимости и окупаемости двигателя	37
4 Требования безопасности изготовления двигателя	38
Заключение	40
Список использованных источников	41

## Введение

Асинхронные двигатели, являются распространенным видом электрических машин, которые потребляют в данный момент времени приблизительно 40% всей вырабатываемой электроэнергии.[5]

Асинхронные двигатели широко распространены в применении металлообрабатывающих, деревообрабатывающих и других приводах электрических станков, грузоподъемных, землеройных машин, вентиляторов, насосов, компрессоров, в лифтах, в ручном электроинструменте, а также в большинстве бытовых приборах и т. д.

Потребности народного хозяйства удовлетворяются главным образом двигателями основного исполнения единых серий общего назначения, т. е. применяемых для привода механизмов, не предъявляющих особых требований к пусковым характеристикам, скольжению, энергетическим показателям, шуму и т. п. Вместе с тем в единых сериях предусматривают также электрические и конструктивные модификации двигателей. Модификации создаются на основе основных исполнений серий с максимальными возможными использованиями узлов и деталей этих исполнений.[6]

Разработанное и внедренное в производство основное исполнение единой серии подразделяется на два основных ряда: серию с высотой оси вращения от 50 до 355 мм и мощностью от 0,12 до 400 кВт при  $2p = 4$ ; серию с высотой оси вращения от 400 до 450 мм и мощностью от 400 до 1000 кВт при  $2p = 4$ .

Двигатели серии 4А выполняются с короткозамкнутым (при высоты оси вращения от 50 до 355 мм) и с фазным роторами (при высоты оси вращения от 200 до 355 мм ). По степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения различают: закрытое исполнение (IP44) с наружным обдувом от вентилятора, расположенного на валу двигателя (IC0141) при  $h = 50 \div 355$  мм; защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при  $h = 160 \div 355$  мм.[4]

Двигатели мощностью от 0,12 до 0,37 кВт изготавливают на номинальные напряжения 220 и 380 В, со схемой соединения обмоток статора  $\Delta$  или  $\lambda$ ; эти двигатели имеют три выводных провода. Двигатели мощностью от 0,55 до 11 кВт, кроме того, выполняют на напряжение 660 В (с теми же схемами соединения и количествами выводных проводов). Двигатели мощностью от 15 до 110 кВт изготавливают на номинальные напряжения 220/380 и 380/660 В, а от 132 до 400 кВт – только на 380/660 В; эти двигатели имеют схему соединения  $\Delta/\lambda$  и шесть выводных проводов. Двигатели с  $h = 50 \div 132$  мм выполняют с изоляцией класса нагревостойкости В; остальные – с изоляцией класса F. Общие технические данные на указанные двигатели регламентированы ГОСТ 19523.[9]

Модификации серии 4А при  $h = 50 \div 355$  мм.[2] На базе основного исполнения серии изготавливаются следующие электрические модификации: двигатели с повышенным пусковым моментом ( $h = 160 \div 250$  мм), предназначенные для привода механизмов, имеющих большие статические и инерционные нагрузки в момент пуска (компрессоры, конвейеры, насосы, поворотные круги и т. д.):

-двигатели с повышенным скольжением ( $h = 71 \div 250$  мм) – для работы в повторно-кратковременных режимах с частыми пусками или с пульсирующей нагрузкой (штамповочные прессы, молоты, поршневые компрессоры и т. д.);[20]

-многоскоростные двигатели ( $h = 56 \div 355$  мм) на две, три и четыре частоты вращения – для привода механизмов со ступенчатым регулированием частоты вращения (металлообрабатывающие станки, механические колосниковые решетки, некоторые виды лебедок и т. д.);

-двигатели на частоту 60 Гц ( $h = 50 \div 355$  мм) – для работы от сети с указанной частотой.[22]

Серия охватывает следующие конструктивные модификации: малошумные двигатели ( $h = 56 \div 160$  мм) – для работы в приводах с повышенными требованиями к уровню шума; встраиваемые двигатели ( $h = 50 \div 250$  мм) – для встраивания в станки и механизмы; двигатели поставляются в виде обмотанного сердечника статора и ротора:

-двигатели со встроенной температурной защитой ( $h = 50\div 355$  мм) – для привода механизмов, работающих со значительными перегрузками, частыми пусками, и т. д.[10]

Серия охватывает следующие модификации по условиям окружающей среды: двигатели тропического исполнения ( $h = 50\div 355$  мм) – для работы в условиях влажного или сухого тропического климата при температуре окружающего воздуха от  $-10$  до  $+45$  °С, относительной влажности до 100 % (при температуре  $+35$  °С), при воздействии солнечной радиации, песка, пыли и плесневых грибков:

-двигатели влагоморозостойкого исполнения ( $h = 50\div 355$  мм) – для работы при температуре окружающей среды до  $-40$  °С и относительной влажности 100 % (при температуре  $+25$  °С);

-двигатели химостойкого исполнения ( $h = 50\div 355$  мм) – для работы при температуре окружающей среды в пределах  $\pm 40$  °С, относительной влажности 80 % (при температуре  $+25$  °С), наличии химически активной невзрывоопасной среды.

Серия охватывает следующие исполнения по степени защиты от внешних воздействий и по способу охлаждения: защищенное исполнение (IP23) с самовентиляцией (IC01) при  $h = 400$  и  $450$  мм:

-закрытое исполнение (IP44) с охлаждением с помощью воздухоохладителя (IC0161) при  $h = 400$  и  $450$  мм.[8]

Двигатели изготавливают с короткозамкнутым или фазным ротором и на номинальное напряжение 6000 В. Обмотка статора имеет шесть выводных проводов, соединенных в звезду.[23]

# 1 Электрические и магнитные расчеты

## 1.1 Основные параметры[1]

### 1.1.1 Высота оси вращения (мм)

$$h=200 \quad (1.1)$$

### 1.1.2 Внешний диаметр магнитопровода (мм)

$$D_{H1max}=359 \quad (1.2)$$

### 1.1.3 Расчет внутреннего диаметра магнитопровода в статоре (мм)

$$D_1 = 0,72 D_{H1} - 3 = 0,72 \cdot 359 - 3 = 255 \quad (1.3)$$

### 1.1.4 Входная мощность (Вт)

$$P' = k_n \cdot P_2 / \eta \cdot \cos \varphi = 0,96 \cdot 22000 / 0,89 \cdot 0,87 = 0,53 \quad (1.4)$$

### 1.1.5 Коэффициент нагрузки

$$k_H = 0,97 \quad (1.5)$$

### 1.1.6 КПД

$$\eta = 0,89 \quad (1.6)$$

### 1.1.7 Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = 0,87 \quad (1.7)$$

### 1.1.8 Электрическая нагрузка (А/см)

$$A_1 = 360 \cdot 1 = 360 \quad (1.8)$$

### 1.1.9 Магнитная нагрузка (Тл)

$$B'_\delta = 0,78 \cdot 1 = 0,78 \quad (1.9)$$

### 1.1.10 Начальный параметр обмоточного коэффициента

$$K_{об}' = 0,94 \quad (1.10)$$

### 1.1.11 Расчет длины магнитопровода статора (мм)

$$l'_1 = 8,62 \cdot 10^7 \cdot P'_1 / D_1^2 \cdot n_1 \cdot A_1 \cdot B'_\delta \cdot k_{об1} = 8,62 \cdot 10^7 \cdot 27276 / 252^2 \cdot 1000 \cdot 360 \cdot 0,78 \cdot 0,94 = 136 = 0,53 \quad (1.11)$$

### 1.1.12 Окончательная длина магнитопровода статора (мм)

$$l = 136 \quad (1.12)$$

1.1.13 Соотношение длины и диаметра магнитопровода статора

$$\lambda = l_1 / D_1 = 136 / 255 = 0,53 \quad (1.13)$$

1.1.14 Максимальное значение соотношения длины и диаметра магнитопровода статора

$$\lambda_{\max} = 1,33 - 0,00087 \cdot D_{H1} = 1,33 - 0,00087 \cdot 359 = 1 \quad (1.14)$$

1.1.15 Расчет в сердечнике статора количества пазов

$$z_1 = 2pm_1q_1 = 6 \cdot 3 \cdot 3 = 54 \quad (1.15)$$

1.1.16 Расчет в полюсе и фазе статора количества пазов

$$q_1 = z_1 / (2pm_1) = 54 / (2 \cdot 3 \cdot 3) = 3 \quad (1.16)$$

1.1.17 Внешний диаметр магнитопровода в роторе (мм)

$$D_{H2} = D_1 - 2\delta = 255 - 2 \cdot 0,5 = 254 \quad (1.17)$$

1.1.18 Расчет внутреннего диаметра всех листов ротора (мм)

$$D_2 \approx 0,23D_{H1} = 0,23 \cdot 359 = 82 \quad (1.18)$$

1.1.19 Расчет магнитопроводной длины (мм)

$$l_2 = l_1 = 136 \quad (1.19)$$

1.1.20 Расчет в сердечнике ротора точного количества пазов

$$z_2 = 2pm_2q_2 = 51 \quad (1.20)$$

1.2 Определение параметров обмотки статора

1.2.1 Расчет коэффициента распределения

$$k_{p1} = 0,5 / \left[ q_1 \sin(\alpha / 2) \right] = 0,5 / (3 \cdot \sin 10) = 1,06 \quad (2.1)$$

1.2.2 Расчет диаметрального шага

$$y_{H1} = z_1 / (2p) = 54 / 6 = 9 \quad (2.2)$$

1.2.3 Расчет обмоточного коэффициента

$$k_{об1} = k_{p1} k_{y1} = 1,06 \cdot 1 = 1 \quad (2.3)$$

1.2.4 Начальный параметр магнитного потока (Вб)

$$\Phi' = B'_\delta D_1 l'_1 10^{-6} / p = 0,78 \cdot 255 \cdot 136 \cdot 10^6 / 3 = 0,009 \quad (2.4)$$

1.2.5 Расчет предварительного количества витков в обмотках фаз

$$\omega'_1 = k_H U_1 / (22k_{об1} (f_1 / 50) \Phi') = 0,96 \cdot 220 / (222 \cdot 1,06 \cdot 1 \cdot 0,009) = 99 \quad (2.5)$$

1.2.6 Расчет предварительного количества в пазах эффективных проводников

$$N'_{n1} = \omega'_1 a_1 / (pq_1) = 99 \cdot 1 / (3 \cdot 3) = 11 \quad (2.6)$$

1.2.7 Окончательное количество в пазах эффективных проводников

$$N_{n1} = 11 \quad (2.7)$$

1.2.8 Окончательное количество витков в обмотках фаз

$$\omega_1 = N_{n1} pq_1 / a_1 = 11 \cdot 3 \cdot 3 / 1 = 99 \quad (2.8)$$

1.2.9 Магнитный поток (Вб)

$$\Phi = \Phi' \omega'_1 / \omega_1 = 0,009 \cdot 99 / 99 = 0,009 \quad (2.9)$$

1.2.10 Расчет индукции в воздушном зазоре (Тл)

$$B_\delta = B'_\delta \omega'_1 / \omega_1 = 0,78 \cdot 99 / 99 = 0,78 \quad (2.10)$$

1.2.11 Предпочтительный ток фаз (А)

$$I_1 = P_2 \cdot 10^3 / (3U_1 \eta' \cos \varphi') = 22000 / (3 \cdot 220 \cdot 0,89 \cdot 0,87) = 43 \quad (2.11)$$

1.2.12 Расчет линейной нагрузки статора (А/см)

$$A_1 = 10N_{n1} z_1 I_1 / (\pi D_1 a_1) = 10 \cdot 11 \cdot 54 \cdot 43 / (3,14 \cdot 255 \cdot 1) = 318 \quad (2.12)$$

1.2.13 Магнитная индукция самой спинки статора (Тл)

$$B_{c1} = 1,6 \quad (2.13)$$

1.2.14 Расчет зубцового деления (мм)

$$t_1 = \pi D_1 / z_1 = 3,14 \cdot 255 / 54 = 14,8 \quad (2.14)$$

1.2.15 Расчет магнитной индукции всех зубцов статора (Тл)

$$B_{z1} = 1,7 \quad (2.15)$$

1.2.16 Расчет ширины одного зубца (мм)

$$b_{31} = t_1 B_{\delta} / (k_c B_{31}) = 14,8 \cdot 0,78 / (0,97 \cdot 1,7) = 7 \quad (2.16)$$

1.2.17 Расчет высоты спины статора (мм)

$$h_{c1} = \Phi \cdot 10^6 / (2k_c l_1 B_{c1}) = 0,009 \cdot 10^6 / (2 \cdot 0,97 \cdot 136 \cdot 1,6) = 21 \quad (2.17)$$

1.2.18 Расчет высоты паза (мм)

$$h_{n1} = (D_{n1} - D_1) / 2 - h_{c1} = (359 - 255) / 2 - 21 = 31 \quad (2.18)$$

1.2.19 Расчет большой ширины паза (мм)

$$b_1 = (D_1 + 2h_{n1}) / z_1 - b_{31} = (3,14 \cdot (255 + 2 \cdot 31) / 54) - 7 = 11 \quad (2.19)$$

1.2.20 Расчет меньшей ширины паза (мм)

$$b_2 = (D_1 + 2h_{u1} - b_{u1}) - z_1 b_{31} / (z_1 - \pi) = (3,14 \cdot (255 + 2 \cdot 0,7 - 4,2) - 54 \cdot 7) / (54 - 3,14) = 8 \quad (2.20)$$

1.2.21 Проверка большей и меньшей ширины паза, при неизменной ширине одного паза

$$z_1(b_1 - b_2) + \pi(b_2 - b_{u1}) - 2\pi(h_{n1} - h_{u1}) \approx 0 \quad (2.21)$$

$$54 \cdot (11 - 8) + 3,14 \cdot (8 - 4,2) - 2 \cdot 3,14 \cdot (31 - 0,7) = 0,1$$

1.2.22 Нахождение площади поперечного сечения паза в штампе (мм<sup>2</sup>)

$$S_{n1} = \frac{b_1 + b_2}{2} \left( h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} \right) = \frac{11 + 8}{2} \cdot (31 - 4,2 - \frac{8 - 4,2}{2}) = 373 \quad (2.22)$$

1.2.23 Расчет площади поперечного паза в свете (мм<sup>2</sup>)

$$S'_{n1} = \left( \frac{b_1 + b_2}{2} - b_c \right) \left( h_{n1} - h_{u1} - \frac{b_2 - b_{u1}}{2} - h_c \right) = \left( \frac{11 + 8}{2} - 0,1 \right) \cdot (31 - 0,7 - \frac{8 - 4,2}{2} - 0,4) = 263 \quad (2.23)$$

1.2.24 Расчет площади сечения корпусной изоляции (мм<sup>2</sup>)

$$S_u = b_{u1} (2h_{n1} + b_1 + b_2) = 0,4 \cdot (2 \cdot 31 + 11 + 8) = 32 \quad (2.24)$$

1.2.25 Расчет площади прокладок между катушками, под клином и на дне паза(мм<sup>2</sup>)

$$S_{np} = 0,5b_1 + 0,75b_2 = 0,5 \cdot 11 + 0,75 \cdot 8 = 11,8 \quad (2.25)$$

1.2.26 Расчет площади паза занимаемой обмоткой (мм<sup>2</sup>)

$$S''_{n1} = S'_{n1} - S_u - S_{np} = 263 - 32 - 11,8 = 219,2 \quad (2.26)$$

1.2.27 Первичная ширина шлица (мм)

$$b'_{ш1} \approx 0,3\sqrt{h} = 0,3 \cdot 14,14 = 42 \quad (2.27)$$

1. 2.28 Коэффициент заполнения

$$k_n = N_{n1} c(d')^2 / S''_{n1} = 11 \cdot 2 \cdot 7,84 / 219,2 = 0,78 \quad (2.28)$$

1.2.29Площадь под обмотку в пазу (мм<sup>2</sup>)

$$c(d')^2 = k_n S''_{n1} / N_{n1} \cdot = 219,2 \cdot 0,75 / 11 = 14,9 \quad (2.29)$$

1.2.30 Расчет диаметра изолированного провода (мм)

$$d' = \sqrt{k_n S'_{n1} / (N_{n1} c)} = \sqrt{0,75 \cdot 219,2 / (11 \cdot 2)} = 2,73 \quad (2.30)$$

1.2.31 Расчет ширины шлица (мм)

$$b''_{ш1} = d' + 2b_u + 0,4 = 2,8 + 2 \cdot 0,4 + 0,4 = 4,2 \quad (2.31)$$

1.2.32 Конечная ширина шлица (мм)

$$b_{ш1} = 4,2 \quad (2.32)$$

1.2.33 Расчет плотности тока в обмотках статора (А/мм<sup>2</sup>)

$$J_1 = I_1 / (c S a_1) = 43 / (2 \cdot 4,68 \cdot 1) = 4,59 \quad (2.33)$$

1.2.34 Произведение нагрузки линейной на плотность тока в обмотке A<sub>1</sub>J<sub>1</sub>.

$$A_1 J_1 = A_1 \cdot J_1 = 318 \cdot 4,59 = 1460 \quad (2.34)$$

1.2.35 Дополнительное произведение нагрузки линейной на плотность тока в обмотке A<sub>1</sub>J<sub>1</sub>.

$$(A_1 J_1)_{доп} = A_1 J_1 \cdot k = 2100 \cdot 0,75 = 1575 \quad (2.35)$$

1.2.36 Расчет среднего зубцового деления статора

$$t_{cp1} = \pi(D_1 + h_{n1}) / z_1 = 3,14 \cdot (255 + 31) / 54 = 16,6 \quad (2.36)$$

1.2.37 Расчет средней ширины в обмотке катушки статора

$$b_{cp1} = t_{cp1} y_{n1} = 16,6 \cdot 9 = 149,6 \quad (2.37)$$

1.2.38 Расчет средней длины части передней катушки

$$l_{л1} = (1,16 + 0,14p)b_{cp1} + 15 = (1,16 + 0,14 \cdot 3)149,6 + 15 = 251,3 \quad (2.38)$$

1.2.39 Расчет средней длины одного витка

$$l_{cp1} = 2(l_1 + l_{л1}) = 2 \cdot (136 + 251,3) = 774,6 \quad (2.39)$$

1.2.40 Расчет длины вылета передней части в обмотке (мм):

$$l_{B1} = (0,12 + 0,15p)b_{cp1} + 10 = (0,12 + 0,15 \cdot 3) \cdot 149,6 + 10 = 95,2 \quad (2.40)$$

1.3 Определение параметров обмотки ротора

1.3.1 Расчет высоты паза для наружного диаметра магнитопровода (мм)

$$h_{n2} = 49 \quad (3.1)$$

1.3.2 Расчет высоты спинки (мм)

$$h_{c2} = 0,4D_{н2} - h_{n2} = 0,4 \cdot 255 - 49 = 53 \quad (3.2)$$

1.3.3 Расчет магнитной индукции (Тл)

$$B_{c2} = \Phi \cdot 10^6 / (2k_c l_2 h_{c2}) = 0,009 \cdot 10^6 / (2 \cdot 0,97 \cdot 136 \cdot 37) = 0,92 \quad (3.3)$$

1.3.4 Расчет зубцового деления по внешнему диаметру (мм)

$$t_2 = \pi D_{н2} / z_2 = 3,14 \cdot 215 / 51 = 13,2 \quad (3.4)$$

1.3.5 Расчет магнитной индукции в зубцах (Тл)

$$B_{з2} = 1,8 \quad (3.5)$$

1.3.6 Расчет ширины каждого зубца (мм)

$$b_{з2} = t_2 B_{\delta} / (B_{з2} k_c) = 13,2 \cdot 0,78 / (1,8 \cdot 0,97) = 5,9 \quad (3.6)$$

1.3.7 Расчет меньшего радиуса паза (мм)

$$r_2 = \frac{\pi(D_{H2} - 2h_{n2} - z_2 b_{32})}{2(\alpha_2 - \pi)} = \frac{3,14 \cdot (255 - 2 \cdot 49) - 51 \cdot 5,9}{2 \cdot (51 - 3,14)} = 0,69 \quad (3.7)$$

1.3.8 Расчет большого радиуса (мм)

$$r_1 = \frac{\pi(D_{H2} - h_{m2} - 2h_2 - z_2 b_{32})}{2(\alpha_2 + \pi)} = \frac{3,14 \cdot (255 - 2 \cdot 49) - 51 \cdot 5,9}{2 \cdot (51 + 3,14)} = 3,4 \quad (3.8)$$

1.3.9 Нахождения расстояния между большим и меньшим радиусами (мм)

$$h_1 = h_{n2} - h_{m2} - h_2 - r_1 - r_2 = 49 - 0,7 - 3,4 - 0,96 = 44,2 \quad (3.9)$$

1.3.10 Проверка большого и меньшего радиуса, при неизменной ширине каждого зубца

$$\begin{aligned} \pi h_1 - z_2(r_1 - r_2) &\approx 0 \\ 3,14 \cdot 44,2 - 51 \cdot (3,4 - 0,69) &= 0,5 \end{aligned} \quad (3.10)$$

1.3.11 Расчет площади стержня в разрезе, которая равна площади паза в разрезе (мм<sup>2</sup>)

$$\begin{aligned} S_{cm} = s_{H2} &= 0,5\pi(r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2)h = 0,5 \cdot 3,14 \cdot (3,4^2 + 0,69^2) + (3,4 + \\ &+ 0,69) \cdot 44,2 = 199,5 \end{aligned} \quad (3.11)$$

1.3.12 Площадь кольца в разрезе (мм<sup>2</sup>)

$$S_{кл} = 0,4z_2 S_{cm} / (2p) = 0,4 \cdot 51 \cdot 199,5 / 6 = 678 \quad (3.12)$$

1.3.13 Расчет высоты кольца (мм)

$$h_{кл} \approx 1,2h_{n2} = 1,2 \cdot 49 = 58,8 \quad (3.13)$$

1.3.14 Расчет длины развернутого кольца (мм)

$$l_{кл} = S_{кл} / h_{кл} = 678 / 58,8 = 11,5 \quad (3.14)$$

1.3.15 Расчет среднего диаметра кольца влитой клетке (мм)

$$D_{кл.ср} = D_{H2} - h_{кл} = 255 - 58,8 = 156,2 \quad (3.15)$$

#### 1.4 Расчет магнитной цепи

1.4.1 Коэффициент, который учитывает когда увеличивается магнитное сопротивление, при зубчатом строении статора  $k_{\delta 1} = 1 + b_{u1} / (t_1 - b_{u1} + 5\delta_1 / b_{u1})$

$$= 1 + \frac{4,2}{14,8 - 4,2 + 5 \cdot 0,5 \cdot 14,8 / 4,2} = 1,16 \quad (4.1)$$

1.4.2 Коэффициент, который учитывает когда увеличивается магнитное сопротивление, при зубчатом строении ротора

$$k_{\delta 2} = 1 + b_{u2} / (t_2 - b_{u2} + 5\delta_2 / b_{u2}) = 1 + \frac{1,5}{13,2 - 1,5 + 5 \cdot 0,5 \cdot 13,2 / 1,5} = 1,04 \quad (4.2)$$

1.4.3 Коэффициент, который учитывает когда уменьшается магнитное сопротивление на статоре, либо роторе

$$k_K = 1 \quad (4.3)$$

1.4.4 Формула, по которой рассчитывается общий воздушный зазор

$$k_{\delta} = k_{\delta 1} k_{\delta 2} k_K = 1,16 \cdot 1,04 \cdot 1,0 = 1,2 \quad (4.4)$$

1.4.5 МДС для воздушного зазора (А)

$$F_{\delta} = 0,8 \delta k_{\delta} B_{\delta} \cdot 10^3 = 0,8 \cdot 0,5 \cdot 1,2 \cdot 0,78 \cdot 10^3 = 374 \quad (4.5)$$

1.4.6 Деление зубца на одну третью высоты зубца (мм)

$$t_{1(1/3)} = \pi(B_1 + (2/3)h_{n1}) / z_1 = \pi(255 + 2 \cdot 31 / 3) / 54 = 16 \quad (4.6)$$

1.4.7 Коэффициент каждого зубца

$$k_{z(1/3)} = \left[ t_{1(1/3)} / (b_{z1} k_c) \right] - 1 = 16 / (7 \cdot 0,97) - 1 = 1,35 \quad (4.7)$$

1.4.8 Сила магнитного поля (А / см)

$$H_{z1} = 11,5 \quad (4.8)$$

1.4.9 Расчет средней длины пути, которую проходит магнитный поток (мм)

$$L_{31} = h_{n1} = 31 \quad (4.9)$$

1.4.10 МДС для зубцов при трапециевидальных полузакрытых пазах статора (А)

$$F_{31} = 0,1H_{31}L_{31} = 0,1 \cdot 11,5 \cdot 31 = 35,6 \quad (4.10)$$

1.4.11 Сила магнитного поля (А / см)

$$H_{32} = 15,2 \quad (4.11)$$

1.4.12 Расчет средней длины пути, которую проходит магнитный поток (мм)

$$L_{32} = h_{n2} - 0,2r_2 = 49 - 0,2 \cdot 0,69 = 48,8 \quad (4.12)$$

1.4.13 МДС для зубцов при овальных полузакрытых и закрытых пазах ротора (А)

$$F_{32} = 0,1H_{32}L_{32} = 0,1 \cdot 15,2 \cdot 48,8 = 74,1 \quad (4.13)$$

1.4.14 Сила магнитного поля (А / см):

$$H_{c1} = 7,5 \quad (4.14)$$

1.4.15 Расчет средней длины пути, которую проходит магнитный поток (мм)

$$L_{c1} = \pi(D_{n1} - h_{c1}) / (4p) = \pi (359 - 21) / (4 \cdot 3) = 88 \quad (4.15)$$

1.4.16 МДС статора спинки (А)

$$F_{c1} = 0,1H_{c1}L_{c1} = 0,1 \cdot 7,5 \cdot 88 = 66 \quad (4.16)$$

1.4.17 Сила магнитного поля (А/см)

$$H_{c2} = 1,58 \quad (4.17)$$

1.4.18 Расчет средней длины пути, которую проходит магнитный поток (мм)

$$L_{c2} = \pi \left( D_2 + h_{c2} + \frac{4}{3}d_{к2} \right) / (4p) = \pi (82 - 53) / (4 \cdot 3) = 35 \quad (4.18)$$

1.4.19 МДС ротора спинки (А)

$$F_{c2} = 0,1H_{c2}L_{c2} = 0,1 \cdot 1,58 \cdot 35 = 5,5 \quad (4.19)$$

1.4.20 Суммарная ЭДС магнитной цепочки одного полюса (А)

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{31} + F_{32} + F_{c1} + F_{c2} = 374 + 35,6 + 74,1 + 66 + 5,5 = 555,2 \quad (4.20)$$

1.4.21 Коэффициент насыщенности

$$k_{нас} = F_{\Sigma} / F_{\delta} = 555,2 / 374 = 1,48 \quad (4.21)$$

1.4.22 Расчет тока намагничивания (А)

$$I_M = 2,22F_{\Sigma} p / (m_1 \omega_1 k_{обм1}) = \frac{2,22 \cdot 555,2 \cdot 1}{3 \cdot 99 \cdot 1} = 4,14 \quad (4.22)$$

1.4.23 Ток намагничивания (о.е)

$$I_{M*} = I_M / I_1 = 4,14 / 43 = 0,09 \quad (4.23)$$

1.4.24 ЭДС для Х.Х (В)

$$E = k_H U_1 = 0,96 \cdot 220 = 211,2 \quad (4.24)$$

1.4.25 Расчет главного индуктивного сопротивления (Ом)

$$x_M = E / I_M = 211,2 / 4,14 = 51 \quad (4.25)$$

1.4.26 Расчет главного индуктивного сопротивления (о.е)

$$x_{M*} = x_M I_1 / U_1 = 51 \cdot 43 / 220 = 9,96 \quad (4.26)$$

1.5 Активное и индуктивное сопротивление обмоток

1.5.1 Расчет активного сопротивления обмоток фаз (Ом)

$$r_1 = \omega_1 l_{cp1} / (\rho_{M20} a_1 cs \cdot 10^3) = \frac{99 \cdot 774,6}{57 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 4,68 \cdot 10^3} = 0,14 \quad (5.1)$$

1.5.2 Расчет активного сопротивления обмоток фаз (о. е.)

$$r_{1*} = r_1 I_1 / U_1 = 0,14 \cdot 43 / 220 = 0,027 \quad (5.2)$$

1.5.3 Проверка активного сопротивления обмоток фаз (о. е.)

$$r_{1*} = \pi D_1 (A_1 J_1) l_{cp1} / (114 \cdot 10^4 m_1 U_1 I_1) = \frac{\pi 255 \cdot 1460 \cdot 774,6}{114 \cdot 10^4 \cdot 3 \cdot 220 \cdot 43} = 0,027 \quad (5.3)$$

#### 1.5.4 Каждый размер паза статора

$$b_2 = 8; b_{ш1} = 4,2; h_{ш1} = 0,5; h_{к1} = 0,7; \\ h_2 = 0,6; h_{п1} = 31; h_1 = 31 - 0,5 - 0,7 - 0,6 - 0,4 = 28,8 \quad (5.4)$$

#### 1.5.5 Коэффициент укорочения шага

$$k_{\beta 1} = 1 \quad (5.5)$$

#### 1.5.6 Коэффициент укорочения шага

$$k'_{\beta 1} = 1 \quad (5.6)$$

#### 1.5.7 Расчет коэффициента рассеяния проводимости при трапецеидально закрытом пазу

$$\lambda_{n1} = \frac{h_1}{3b_2} k_{\beta 1} + \left( \frac{3h_{к1}}{b_2 + 2b_{ш1}} + \frac{h_{ш1}}{b_{ш1}} + \frac{h_2}{b_2} \right) \cdot k_{\beta'1} = \frac{29,2}{3 \cdot 8} \cdot 0,8 + \left( \frac{3 \cdot 0,7}{8 + 2 \cdot 4,2} + \frac{0,7}{4,2} + \frac{0,6}{8} \right) \cdot 1 = 1,476 \quad (5.7)$$

#### 1.5.8 Коэффициент

$$k_{Д1} = 0,0141 \quad (5.8)$$

#### 1.5.9 Коэффициент, который учитывает влияние открытого паза статора на дифференциальное рассеяние

$$k_{ш1} = 1 - \left[ 0,033 b_{ш1}^2 / (t_{1\min} \delta) \right] = 1 - \frac{0,033 \cdot 4,2^2}{14,8 \cdot 0,5} = 0,92 \quad (5.9)$$

#### 1.5.10 Коэффициент

$$k_{p1} = 0,88 \quad (5.10)$$

#### 1.5.11 Коэффициент, учитывающий проводимость на дифференциальное рассеяние

$$\lambda_{Д1} = 0,9 t_{1\min} (q_1 k_{об1})^2 k_{p1} k_{ш1} k_{Д1} / (\delta k_{\delta}) = \frac{0,9 (4,8 \cdot 3)^2 \cdot 0,88 \cdot 0,92 \cdot 0,0141}{0,5 \cdot 0,0182} = 2,74 \quad (5.11)$$

1.5.12 Деление полюсов (мм)

$$\tau = \pi D_1 / (2p) = \pi 255 / 6 = 133 \quad (5.12)$$

1.5.13 Коэффициент, учитывающий проводимость рассеяния передней части обмоток

$$\lambda_{л1} = 0,34 \frac{q_1}{l_1} (l_1 - 0,64 \beta \tau_1) = 0,34 \frac{3}{136} (51,3 - 0,64 \cdot 1 \cdot 133) = 1,24 \quad (5.13)$$

1.5.14 Коэффициент, который учитывает проводимость рассеяния

$$\lambda_1 = \lambda_{н1} + \lambda_{Д1} + \lambda_{л1} = 1,47 + 2,74 + 1,24 = 5,45 \quad (5.14)$$

1.5.15 Индуктивные сопротивления обмоток фаз (Ом)

$$x_1 = 1,58 f_1 l_1 \omega_1^2 \lambda_1 / (p q_1 10^8) = \frac{1,58 \cdot 50 \cdot 136 \cdot 99^2}{2 \cdot 3 \cdot 10^8} 5,45 = 0,95 \quad (5.15)$$

1.5.16 Индуктивные сопротивления обмоток фаз (о. е.)

$$x_{1*} = x_1 I_1 / U_1 = 0,95 \cdot 43 / 220 = 0,185 \quad (5.16)$$

1.5.17 Проверка индуктивных сопротивлений обмоток (о. е.)

$$x_{1*} = 0,39 (D_1 A_1)^2 l_1 \lambda_1 \cdot 10^{-7} / (m_1 U_1 I_1 z_1) = \frac{0,39 (55 \cdot 318)^2 \cdot 136 \cdot 5,45 \cdot 10^{-7}}{3 \cdot 220 \cdot 43 \cdot 54} = 0,124 \quad (5.17)$$

1.5.18 Расчет активного сопротивления стержней клеток (Ом)

$$r_{cn} = l_2 / (\rho_{a20} S_{cm} \cdot 10^3) = 136 / (27 \cdot 199,5 \cdot 10^3) = 2,52 \cdot 10^{-5} \quad (5.18)$$

1.5.19 Коэффициент приведений токов кольца к токам стержней

$$k_{np2} = 2\pi p / z_2 = 2\pi \cdot 3 / 51 = 0,36 \quad (5.19)$$

1.5.20 Сопротивление колец, приведенных к токам стержней (Ом)

$$r_{кл} = 2\pi D_{кл.ср} / (\rho_{a20} z_2 S_{кл} k_{np2}^2 10^3) = \frac{2\pi \cdot 156,2}{27 \cdot 51 \cdot 199,5 \cdot 0,36^2 \cdot 10^3} = 2,75 \cdot 10^{-5} \quad (5.20)$$

1.5.21 Расчет основного угла скосов паза (рад)

$$\alpha_{ск} = 2pt_1 \beta_{ск1} / D_1 = 6 \cdot 14,8 / 255 = 0,35 \quad (5.21)$$

1.5.22 Коэффициент скосов паза

$$k_{ск} = 0,996 \quad (5.22)$$

1.5.23 Коэффициент сопоставления сопротивлений обмоток ротора и статора

$$k_{np1} = \frac{4m_1}{z_2} \left( \frac{\omega_1 k_{сб1}}{k_{ск}} \right)^2 = \frac{4 \cdot 3}{51} \left( \frac{99 \cdot 0,96}{0,996} \right)^2 = 2281 \quad (5.23)$$

1.5.24 Расчет активного сопротивления обмоток (Ом)

$$r'_2 = k_{np1} (r_{ом} + r_{кл}) = 2281 (2,52 + 2,75) \cdot 10^{-5} = 0,12 \quad (5.24)$$

1.5.25 Расчет активного сопротивления обмоток (о. е.)

$$r'_{2*} = r'_2 I_1 / U_1 = 0,12 \cdot 43 / 220 = 0,023 \quad (5.25)$$

1.5.26 Расчет тока в роторе в рабочем режиме (А)

$$I_2 = \frac{2\omega_1 k_{сб1} P_2 (0,2 + 0,8 \cos \varphi') 10^3}{U_1 z_2 \eta' \cos \varphi'} = \frac{2 \cdot 99 \cdot 1 \cdot 22 \cdot (0,2 + 0,8 \cdot 0,87) 10^3}{220 \cdot 51 \cdot 0,89 \cdot 0,87} = 449 \quad (5.26)$$

1.5.27 Расчет коэффициент проводимости рассеяний для овальных полузакрытых пазов ротора

$$\lambda_{n2} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_1^2}{2S_{см}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{4r_1} = \frac{0,7}{1,5} + \frac{44,2 + 0,8 \cdot 0,69}{6 \cdot 9,4} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 0,69^2}{2 \cdot 199,5} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 0,69} = 4,48 \quad (5.27)$$

1.5.28 Расчет общего количества на полюса и фазы пазов ротора

$$q_2 = z_2 / (2p_1) = 51 / 6 \cdot 3 = 2,8 \quad (5.28)$$

1.5.29 Дифференциальное рассеяние для ротора

$$k_{Д2} = 0,012 \quad (5.29)$$

1.5.30 Проводимость дифференциального рассеяния

$$\lambda_{Д2} = 0,9 t_2 (z_2 / 6p)^2 k_{Д2} / (\delta k_{\delta}) = \frac{0,9 \cdot 13,2 \cdot (1/6 \cdot 3)^2 \cdot 0,012}{0,5 \cdot 0,0182} = 1,22 \quad (5.30)$$

1.5.31 Проводимость рассеяний короткозамкнутого кольца

$$\lambda_{кл} = \frac{2,9 D_{кл.ср}}{z_2 l_2 k_{np2}^2} \lg \frac{2,35 D_{кл.ср}}{h_{кл} + l_{кл}} = \frac{2,9 \cdot 156,2}{51 \cdot 136 \cdot 0,36^2} \lg \frac{2,35 \cdot 156,2}{58,8 + 11,5} = 0,35 \quad (5.31)$$

1.5.32 Относительные скосы паза ротора, в долевых зубцовых делениях ротора

$$\beta_{ск2} = \beta_{ск1} t_1 / t_2 = 1 \cdot \frac{14,8}{13,2} = 1,12 \quad (5.32)$$

1.5.33 Проводимость рассеяния скосов паза

$$\lambda_{ск} = t_2 \beta_{ск2}^2 / (9,5 \delta k_{\delta} k_{нас}) = \frac{13,2 \cdot 1,12^2}{9,5 \cdot 0,5 \cdot 0,0182 \cdot 75} = 2,55 \quad (5.33)$$

1.5.34 Проводимость рассеяния обмоток

$$\lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{Д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск} = 4,48 + 1,22 + 0,35 + 2,55 = 8,6 \quad (5.34)$$

1.5.35 Расчет индуктивного сопротивления обмоток ротора (Ом)

$$x_2 = 7,9 f_1 l_2 \lambda_2 \cdot 10^{-9} = 7,9 \cdot 50 \cdot 136 \cdot 8,6 \cdot 10^{-9} = 0,46 \cdot 10^{-3} \quad (5.35)$$

1.5.36 Расчет индуктивного сопротивления обмотки ротора, соединенное с обмоткой статора (Ом)

$$x'_2 = k_{np1} x_2 = 2281 \cdot 0,46 \cdot 10^{-3} = 1,05 \quad (5.36)$$

1.5.37 Расчет индуктивного сопротивления обмотки ротора, соединенное с обмоткой статора (о. е.)

$$x'_{2*} = x'_2 I_1 / U_1 = 1,05 \cdot 43 / 220 = 0,2 \quad (5.37)$$

1.5.38 Проверка индуктивного сопротивления обмотки ротора  $x'_{2*}$

$$\begin{aligned} x_1 / x'_2 &\approx 0,7 \div 1,0 \\ 0,95 / 1,05 &= 0,9 \end{aligned} \quad (5.38)$$

1.5.39 Рассеяние статора

$$\tau_1 = x_1 / x_M = 0,95 / 66 = 0,014 \quad (5.39)$$

1.5.40 Сопротивление статора

$$\rho_1 = r_1 m_T / (x_1 + x_M) = 0,14 \cdot 1,22 / (0,95 + 66) = 0,025 \quad (5.40)$$

1.5.41 Расчет преобразованных сопротивлений

$$\begin{aligned} r'_1 &= m_T r_1 = 0,14 \cdot 1,22 = 0,17 \\ x'_1 &= x_1 (1 + \tau_1) = 0,95 \cdot (1 + 0,014) = 0,962 \\ r''_2 &= m_T r'_2 (1 + \tau_1)^2 = 1,22 \cdot 0,12 \cdot (1 + 0,014)^2 = 0,14 \\ x''_2 &= x'_2 (1 + \tau_1)^2 = 1,05 \cdot (1 + 0,014)^2 = 1,08 \end{aligned} \quad (5.41)$$

1.6 Расчет режимов номинального тока и холостого хода

1.6.1 Ток реактивной составляющей (А)

$$I_{c.p} = U_1 / \left[ x_m (1 + \tau_1 (1 + \rho_1^2)) \right] = 220 / [66 (1 + 0,014^2)] = 3,28 \quad (6.1)$$

1.6.2 Расчет электрических потерь (Вт)

$$P_{c.M1} = m_1 I_{c.p}^2 r'_1 (1 + \rho_1^2) = 3 \cdot 3,28^2 \cdot 0,17 \cdot (1 + 0,014^2) = 5,49 \quad (6.2)$$

1.6.3 Расчет стальной массы зубца статора при трапецеидальном пазе (кг)

$$m_{z1} = 7,8 z_1 b_{z1} h_{П1} l_1 k_c \cdot 10^{-6} = 7,8 \cdot 51 \cdot 7 \cdot 31 \cdot 136 \cdot 0,97 \cdot 10^6 = 11,3 \quad (6.3)$$

1.6.4 Расчет магнитных потерь (Вт)

$$P_{31} = 4,4B_{31cp}^2 m_{31} = 4,4 \cdot 0,91^2 \cdot 11,3 = 41,1 \quad (6.4)$$

1.6.5 Стальная масса спинки (кг)

$$m_{c1} = 7,8\pi \left( \Phi_{H1} - h_{c1} \right) h_{c1} l_{1kc} \cdot 10^{-6} = 7,8\pi (59 - 21) \cdot 21 \cdot 136 \cdot 0,97 \cdot 10^{-6} = 22,9 \quad (6.5)$$

1.6.6 Расчет магнитных потерь спинки (Вт)

$$P_{c1} = 4,4B_{c1}^2 m_{c1} = 4,4 \cdot 1,6^2 \cdot 22,9 = 258 \quad (6.6)$$

1.6.7 Сумма всех магнитных потерь у сердечника статора (Вт)

$$P_{c\Sigma} = P_{31} \left[ 1 + 2\sqrt{\frac{t_1}{10}} \left( \delta - 1 \right) \right] + P_{c1} = 44,1 \cdot \left[ 1 + 2\sqrt{14,8 \cdot (23 - 1)^2 / 10} \right] + 258 = 314 \quad (6.7)$$

1.6.8 Расчет механических потерь со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 (Вт)

$$P_{mx\Sigma} = k_{mx} (n_1 / 1000)^2 \left( \Phi_{H1} / 100 \right)^4 = 6,5 \cdot (1000 / 1000)^2 (359 / 100)^4 = 1080 \quad (6.8)$$

1.6.9 Расчет активной составляющей тока х.х. (А)

$$I_{oa} = \left( P_{c.M1} + P_{c\Sigma} + P_{Mx} \right) / \left( \Phi_{1U1} \right) = \frac{6,49 + 314 + 1080}{3 \cdot 220} = 2,12 \quad (6.9)$$

1.6.10 Расчет тока х. х. (А)

$$I_0 = \sqrt{I_{oa}^2 + I_{c.p}^2} = \sqrt{2,12^2 + 3,28^2} = 3,9 \quad (6.10)$$

1.6.11 Расчет коэффициента при х. х.

$$\cos \varphi_0 = I_{oa} / I_0 = 2,12 / 3,9 = 0,54 \quad (6.11)$$

1.6.12 Расчет активного сопротивления к. з. (Ом)

$$r_K = r'_1 + r''_2 = 0,17 + 0,14 = 0,31 \quad (6.12)$$

1.6.13 Расчет индуктивного сопротивления к. з. (Ом)

$$x_K = x'_1 + x''_2 = 0,14 + 1,07 = 1,21 \quad (6.13)$$

1.6.14 Расчет полного сопротивления к. з. (Ом)

$$z_K = \sqrt{r_K^2 + x_K^2} = \sqrt{0,31^2 + 1,21^2} = 1,25 \quad (6.14)$$

1.6.15 Расчет добавочных потерь с номинальной нагрузкой (Вт)

$$P_D = 0,0005P_2 \cdot 10^3 / \eta' = 0,005 \cdot 22 \cdot 10^3 / 0,89 = 123,6 \quad (6.15)$$

1.6.16 Механизационная мощность двигателя (Вт)

$$P'_2 = P_2 \cdot 10^3 + P_{мх} + P_D = 22 \cdot 10^3 + 1080 + 123,6 = 23203 \quad (6.16)$$

1.6.17 Эквивалентные сопротивления схем замещений (Ом)

$$R_H = m_1 U_1^2 / (P'_2 - r_K) + \sqrt{\left( \frac{m_1 U_1^2}{2P'_2} - r_K \right)^2 - z_K^2} = \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 23203} - 0,31 +$$

$$+ \sqrt{\left( \frac{3 \cdot 220^2}{2 \cdot 23203} - 0,31 \right)^2 - 1,25^2} = 5,33 \quad (6.17)$$

1.6.18 Полные сопротивления схем замещений (Ом)

$$z_H = \sqrt{R_H + r_K} + x_K = \sqrt{5,33 + 0,31} + 1,21 = 5,76 \quad (6.18)$$

1.6.19 Проверка результатов эквивалентного и полного сопротивлений (Ом<sup>-1</sup>)

$$R_H / z_H^2 = P'_2 / (m_1 U_1^2)$$

$$\frac{5,33}{5,76^2} = \frac{23203}{3 \cdot 220^2} = 0,17 \quad (6.19)$$

1.6.20 Скольжение (о. е.)

$$S_H = 1 / (1 + R_H / r_2'') = \frac{1}{1 + 5,33 / 0,14} = 0,025 \quad (6.20)$$

1.6.21 Расчет активной составляющей тока (А)

$$I_{с.а} = (P_{С.М1} + P_{С\Sigma}) / (m_1 U_1) = (5,49 + 314) / (3 \cdot 220) = 0,48 \quad (6.21)$$

1.6.22 Расчет тока по ротору (А)

$$I_2'' = U_1 / z_H = 220 / 5,33 = 38 \quad (6.22)$$

1.6.23 Расчет активной составляющей в статоре тока без синхронного вращения (А)

$$I_{a1} = I_{ca} + I''_2 \left( \frac{R_H + r_K}{z_H} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_K}{z_H} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = 0,48 + 38 \cdot \left( \frac{5,33 + 0,31}{5,76} \cdot \frac{1 - 0,025^2}{1 + 0,025^2} + \frac{1,21}{5,76} \cdot \frac{2 \cdot 0,025}{1 + 0,025^2} \right) = 37,2 \quad (6.23)$$

1.6.24 Расчет реактивной составляющей тока

$$I_{p1} = I_{c.p} + I''_2 \left( \frac{x_K}{z_H} \cdot \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{R_H + r'_K}{z_H} \cdot \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = 3,28 + 38 \cdot 0,98 = 40 \quad (6.24)$$

1.6.25 Ток по фазе

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \sqrt{37,2^2 + 40^2} = 54 \quad (6.25)$$

1.6.26 Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = I_{a1} / I_1 = 37,2 / 54 = 0,68 \quad (6.26)$$

1.6.27 Нагрузка (А / см)

$$A_1 = 10 I_1 N_{III} / (a_1 t_1) = \frac{10 \cdot 5,4 \cdot 11}{1 \cdot 14,8} = 401 \quad (6.27)$$

1.6.28 Расчет плотности тока в обмотках статора (А / мм<sup>2</sup>)

$$J_1 = I_1 / (c S a_1) = 54 / (2 \cdot 4,68 \cdot 1) = 5,7 \quad (6.28)$$

1.6.29 Нагрузка (А / см)

$$A_2 = A_1 I''_2 \left( \frac{1 + \tau_1}{\sqrt{1 + \rho_1^2}} k_{об1} \right) / \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_1^2}} k_{об2} k_{ск} \right) = 401 \cdot \frac{38 \cdot (1 + 0,014) \cdot 0,98}{54 \cdot 1 \cdot 0,996} = 287 \quad (6.29)$$

1.6.30 Расчет у стержня тока (А)

$$I_{cm} = I''_2 2 m_1 \omega_1 k_{об1} \left( \frac{1 + \tau_1}{\sqrt{1 + \rho_1^2}} \right) / \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_1^2}} k_{ск} \right) = 38 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 99 \cdot 1 \cdot 1,014 \cdot 1}{51 \cdot 0,996} = 450$$

(6.30)

1.6.31 Расчет в стержне плотности тока (А / мм<sup>2</sup>)

$$J_{cm} = I_{cm} / s_{cm} = 450 / 199,5 = 2,25 \quad (6.31)$$

1.6.32 Ток в короткозамкнутом кольце (А)

$$I_{кл} = I_{cm} / k_{np2} = 450 / 0,36 = 1250 \quad (6.32)$$

1.6.33 Расчет электрических потерь (Вт)

$$P_{M1} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot r_1' = 3 \cdot 54^2 \cdot 0,17 = 1487 \quad (6.33)$$

1.6.34 Расчет электрических потерь (Вт)

$$P_{M1} = m_1 \cdot I_2^2 \cdot r_2' = 3 \cdot 37,2^2 \cdot 0,14 = 581 \quad (6.34)$$

1.6.35 Сумма всех потерь в электродвигателях (Вт)

$$P_{\Sigma} = P_{M1} + P_{M2} + P_{C\Sigma} + P_{Mxx} + P_{Д} = 1487 + 5,49 + 314 + 1080 + 123,6 = 3010 \quad (6.35)$$

1.6.36 Проходная мощность (Вт)

$$P_1 = P_2 \cdot 10^3 + P_{\Sigma} = 22 \cdot 10^3 + 3010 = 25010 \quad (6.36)$$

1.6.37 КПД (%)

$$\eta = (1 - P_{\Sigma} / P_1) \cdot 100 = (1 - 3010 / 25010) \cdot 100 = 88 \quad (6.37)$$

1.6.38 Мощность электрическая (Вт)

$$P_1 = m_1 I_{a1} U_1 = 3 \cdot 37,2 \cdot 220 = 24552 \quad (6.38)$$

1.6.39 Мощность P<sub>2</sub> (Вт)

$$P_2 = m_1 I_1 U_1 \frac{\eta}{100} \cos \varphi = 3 \cdot 54 \cdot 220 \frac{88}{100} \cdot 0,68 = 21327 \quad (6.39)$$

1.7 Расчет рабочих характеристик

Для построения зависимости рабочих характеристик, были рассчитаны основные параметры для мощностей:  $0,25P_2$ ,  $0,5P_2$ ,  $0,75P_2$ ,  $1,25P_2$ . Их зависимости приведены в приложении 1.

## 1.8 Расчет максимального момента

### 1.8.1 Коэффициент переменной части в статоре

$$\lambda_{n1nep} = (3h_{к1} / (b_2 + b_{ш1}) + h_{ш1} / b_{ш1}) k'_\beta = \left( \frac{3 \cdot 0,7}{8 + 4,2} + \frac{0,7}{4,2} \right) \cdot 1 = 0,33 \quad (8.1)$$

### 1.8.2 Коэффициент составляющий в статоре проводимость рассеяний

$$\lambda_{1nep} = \lambda_{n1nep} + \lambda_{Д1} = 0,33 + 2,74 = 3,07 \quad (8.2)$$

### 1.8.3 Коэффициент переменной части в роторе

$$\lambda_{n2nep} = h_{ш2} / b_{ш2} = 0,7 / 1,5 = 0,46 \quad (8.3)$$

### 1.8.4 Коэффициент составляющий в роторе проводимость рассеяний

$$\lambda_{2nep} = \lambda_{n2nep} + \lambda_{Д2} = 0,46 + 1,22 = 1,68 \quad (8.4)$$

### 1.8.5 Расчет индуктивного сопротивления, с зависимостью от насыщений

(Ом)

$$x_{nep} = x'_1 \lambda_{1nep} / \lambda_1 + x''_2 \lambda_{2nep} / \lambda_2 = 0,141 \cdot \frac{0,33}{5,45} + \frac{1,07 \cdot 4,68}{8,6} = 1,24 \quad (8.5)$$

### 1.8.6 Расчет индуктивного сопротивления, без зависимости от насыщений

(Ом)

$$x_{пост} = x'_1 (\lambda_1 - \lambda_{1nep}) / \lambda_1 + x''_2 (\lambda_2 - \lambda_{2nep}) / \lambda_2 = 0,141 \cdot \frac{5,45 - 3,07}{5,45} + 1,07 \cdot \frac{8,6 - 1,68}{8,6} = 0,92 \quad (8.6)$$

1.8.7 Расчет тока в роторе, который соответствует  $M_{\max}$

$$I''_{M2} = \frac{U_1}{\sqrt{2 \left[ \left( r'_1 + \zeta_{\text{ном}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right)^2 + r'_1 \zeta_{\text{ном}} \right]}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \delta a_1 \left[ r'_1 + 2 \zeta_{\text{ном}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right]}{2N_{nl} \left[ \left( r'_1 + \zeta_{\text{ном}} + 0,0825x_{\text{пер}} \right)^2 + r'_1 \zeta_{\text{ном}} \right]} = \frac{220}{\sqrt{2 \left[ 0,17^2 + \left( 0,92 + 0,0825 \cdot 1,24 \right)^2 + 0,17 \left( 0,92 + 0,0825 \cdot 1,24 \right) \right]}} - \frac{\left( 1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot [0,17 + 2 \cdot (0,92 + 0,0825 \cdot 1,24)] \cdot 1,24 \right)}{\left( 2 \cdot 55 \cdot [0,17^2 + (0,92 + 0,0825 \cdot 1,24)^2 + 0,17 \cdot (0,92 + 0,0825 \cdot 1,24)] \right)} = 122 \quad (8.7)$$

1.8.8 Расчет полных сопротивлений схем замещений с максимальным моментом (Ом)

$$z_M = U_1 / I''_{M2} = 220 / 122 = 1,8 \quad (8.8)$$

1.8.9 Когда неограниченное скольжение ( $s > \infty$ )

$$z_\infty = \sqrt{z_1'^2 + x_H^2} = \sqrt{0,17^2 + 2 \cdot 3,6^2} = 1,23 \quad (8.9)$$

1.8.10 Расчет эквивалентного сопротивления с максимальным моментом (Ом)

$$R_M = z_\infty + r'_1 = 1,23 + 0,17 = 1,4 \quad (8.10)$$

1.8.11 Расчет разности максимального момента

$$\frac{M_{\max}}{M_H} = \frac{m_1 U_1^2 \left( 1 - s'_H \right)}{2R_M P_2 \cdot 10^3} = \frac{3 \cdot 220^2 \left( 1 - 0,011 \right)}{2 \cdot 1,4 \cdot 22 \cdot 10^3} = 2,4 \quad (8.11)$$

1.8.12 Расчет скольжения с максимальным моментом (о. е.)

$$s_M = r''_2 / z_\infty = 0,14 / 1,23 = 0,1 \quad (8.12)$$

## 1.9 Пусковые ток и момент

### 1.9.1 Размер высоты стержня с полузакрытыми пазами (мм)

$$h_{cm} = h_{n2} - h_{u2} = 49 - 0,7 = 48,3 \quad (9.1)$$

### 1.9.2 Уровень вытеснений тока

$$\xi = 0,0735 h_{cm} \sqrt{s/m_T} = 0,0735 \cdot 48,3 \sqrt{0,018/1,22} = 0,53 \quad (9.2)$$

### 1.9.3 Коэффициент $\varphi$

$$\varphi = 0,1 \quad (9.3)$$

### 1.9.4 Рассчитанная длина прохождения тока в стержне (мм)

$$h_p = h_{cm} / (1 + \varphi) = 48,3 / (1 + 0,1) = 43 \quad (9.4)$$

### 1.9.5 Расчет ширины стержня в рассчитанной длине прохождения тока (мм)

$$b_p = 2r_1 - \frac{2(r_1 - r_2)}{h_1} (h_p - r_1) = 2 \cdot 3,4 - \frac{2 \cdot (3,4 - 0,69)}{44,2} (43 - 3,4) = 2 \quad (9.5)$$

### 1.9.6 Расчет площади сечения в рассчитанной длине прохождения тока

$$s_p = \frac{\pi}{2} r_1^2 + \left( r_1 + \frac{b_p}{2} \right) (h_p - r_1) = \frac{\pi}{2} \cdot 3,4^2 + (3,4 + 2/2) (43 - 44,2) = 13 \quad (9.6)$$

### 1.9.7 Коэффициент вытеснений

$$k_{B.T} = s_{cm} / s_p = 199,5 / 13 = 15,3 \quad (9.7)$$

### 1.9.8 Расчет активного сопротивления клеток стержней (Ом)

$$r_{cm.n} = r_{cm} k_{B.T} = 2,52 \cdot 10^{-5} \cdot 15,3 = 38,6 \cdot 10^{-5} \quad (9.8)$$

### 1.9.9 Расчет активного сопротивления в роторе обмоток (Ом)

$$r'_{2n} = k_{np1} (r_{cm.n} + r_{кл}) = 2281 \cdot (38,6 + 2,75) \cdot 10^{-5} = 0,94 \quad (9.9)$$

### 1.9.10 Коэффициент $\psi$

$$\psi = 0,9 \quad (9.10)$$

1.9.11 Проводимость рассеяний пазов в роторе

$$\lambda_{n2n} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} + \left[ \frac{h_1 + 0,8r_2}{6r_1} \left( 1 - \frac{\pi r_1^2}{2s_{cm}} \right)^2 + 0,66 - \frac{b_{ш2}}{4r_1} \right] \psi = \frac{0,7}{1,5} +$$

$$+ \left[ \frac{42,2 + 0,8 \cdot 0,69}{6 \cdot 3,4} \cdot \left( 1 - \frac{\pi \cdot 0,69^2}{2 \cdot 199,5} \right)^2 + 0,66 - \frac{1,5}{4 \cdot 3,4} \right] = 2,6 \quad (9.11)$$

1.9.12 Проводимость рассеяний в роторе обмоток

$$\lambda_{2n} = \lambda_{n2n} + \lambda_{Д2} + \lambda_{кл} + \lambda_{ск} = 2,6 + 1,22 + 0,35 + 2,55 = 6,72 \quad (9.12)$$

1.9.13 Расчет индуктивного сопротивления рассеяний для двигателя, которое зависит от насыщенности (Ом)

$$x_{пер} = x'_1 \frac{\lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_2 \frac{\lambda_{2пер}}{\lambda_{2n}} = 0,14 \cdot \frac{3,07}{5,45} + 1,07 \cdot \frac{0,46}{6,72} = 1,05 \quad (9.13)$$

1.9.14 Расчет индуктивного сопротивления рассеяний для двигателя, которое не зависит от насыщенности (Ом)

$$x_{пост} = x'_1 \frac{\lambda_1 - \lambda_{1пер}}{\lambda_1} + x''_2 \frac{\lambda_{2n} - \lambda_{2пер}}{\lambda_{2n}} = 0,14 \cdot \frac{5,45 - 3,07}{5,45} + 1,07 \cdot$$

$$\cdot \frac{6,72 - 0,46}{6,72} = 1,05 \quad (9.14)$$

1.9.15 Расчет активного сопротивления при коротком замыкании (Ом)

$$r_{к.н} = r'_1 + r'_{2n} m_T \left( + \tau_1 \right)^2 \left( + \rho_1 \right)^2 = 3,4 + 0,94 \cdot 1 \cdot (1 + 0,014)^2 \cdot (1 + 0,025)^2 =$$

4,4

(9.15)

### 1.9.16 Расчет тока в роторе при запуске машины

$$\begin{aligned}
 I''_{n2} &= \frac{U_1}{\sqrt{r_{к.н}^2 + \left(\sigma_{ном} + 0,0825x_{пер}\right)^2}} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \delta a_1 x_{пер} \left(\sigma_{ном} + 0,0825x_{пер}\right)}{N_{n1} \left[ r_{к.н}^2 + \left(\sigma_{ном} + 0,0825x_{пер}\right)^2 \right]} \\
 &= 220 / \sqrt{4,4^2 + \left(0,5 + 0,0825 \cdot 0,15\right)^2} - \frac{1,24 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 0,15 \cdot \left(0,5 + 0,0825 \cdot 0,15\right)}{99 \cdot \left[ 4,4^2 + \left(0,5 + 0,0825 \cdot 0,15\right)^2 \right]} \\
 &= 117,5
 \end{aligned}
 \tag{9.16}$$

### 1.9.17 Суммарные сопротивления в схемах замещений (Ом)

$$z_{к.н} = U_1 / I''_{n2} = 220 / 117,5 = 1,87 \tag{9.17}$$

### 1.9.18 Индукционные сопротивления в схемах замещений (Ом)

$$x_{к.н} = \sqrt{z_{к.н}^2 - r_{к.н}^2} = \sqrt{1,87^2 - 4,4^2} = 3,98 \tag{9.18}$$

### 1.9.19 Расчет подвижной составляющей тока (А)

$$\begin{aligned}
 I_{n.a1} &= I_{c.a} + I''_{n2} \left( \frac{r_{к.н}}{z_{к.н}} \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} + \frac{x_{к.н}}{z_{к.н}} \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = 0,68 + 117,5 \cdot \\
 &\cdot \left( \frac{4,4}{1,87} + \frac{1 - 0,025^2}{1 + 0,025^2} + \frac{3,98}{1,87} \cdot \frac{2 \cdot 0,025}{1 + 0,025^2} \right) = 119,2
 \end{aligned}
 \tag{9.19}$$

### 1.9.20 Мощная составляющая тока в статоре (А)

$$\begin{aligned}
 I_{n.p1} &= I_{c.p} + I''_{n2} \left( \frac{r_{к.н}}{z_{к.н}} \frac{1 - \rho_1^2}{1 + \rho_1^2} - \frac{x_{к.н}}{z_{к.н}} \frac{2\rho_1}{1 + \rho_1^2} \right) = \\
 &4,68 + 117,5 \cdot \left( \frac{4,4}{1,87} + \frac{1 - 0,025^2}{1 + 0,025^2} + \frac{3,98}{1,87} \cdot \frac{2 \cdot 0,025}{1 + 0,025^2} \right) = 123,2
 \end{aligned}
 \tag{9.20}$$

### 1.9.21 Фазовый ток в статоре (А)

$$I_{n1} = \sqrt{I_{n.a1}^2 + I_{n.p1}^2} = \sqrt{119,2^2 + 123,2^2} = 168,6 \tag{9.21}$$

### 1.9.22 Начальный пусковой ток в долях от номинального

$$I_{n1} / I_1 = 168,6 / 43 = 3,9 \tag{9.22}$$

### 1.9.23 Расчет активного сопротивления в роторе (Ом)

$$r_{2n}'' = r_{2n}' m_T (1 + \tau_1)^2 (1 + \rho_1^2) = 0,94 \cdot 1 \cdot (1 + 0,014)^2 \cdot (1 + 0,025)^2 = 0,94 \quad (9.23)$$

### 1.9.24 Пусковой момент в долях от номинального

$$\frac{M_n}{M_H} = m_1 I_{n2}^2 r_{2n}'' \left( \frac{-s_H}{s} \right) \left( \frac{P_2 \cdot 10^3}{22 \cdot 10^3} \right) = \frac{3 \cdot 117,5^2 \cdot 0,94 \cdot (-0,011)}{22 \cdot 10^3} = 1,3 \quad (9.24)$$

## 1.10 Расчет тепловых и вентиляционных параметров

### 1.10.1 В обмотках статора потеря для наивысшей точки температуры (Вт)

$$P'_{M1} = m_1 I_1^2 m_T' r_1' = 3 \cdot 43^2 \cdot 0,14 \cdot 0,17 = 132 \quad (10.1)$$

### 1.10.2 Расчет внутренней поверхности выстывания активных частей в статоре (мм<sup>2</sup>)

$$S_{n1} = \pi D_1 l_1 = \pi \cdot 255 \cdot 1136 = 1,08 \cdot 10^5 \quad (10.2)$$

### 1.10.3 Расчет периметра в поперечном сечении (мм)[7]

$$\Pi_1 = 2h_{n1} + b_1 + b_2 = 2 \cdot 31 + 11 + 8 = 84 \quad (10.3)$$

### 1.10.4 Поверхности выстывания паза (мм<sup>2</sup>)

$$S_{u.n1} = z_1 \Pi_1 l_1 = 54 \cdot 81 \cdot 136 = 5,9 \cdot 10^5 \quad (10.4)$$

### 1.10.5 Поверхности выстывания лобовой части обмоток (мм<sup>2</sup>)

$$S_{л1} = 4\pi D_1 l_{B1} = 4 \cdot \pi \cdot 255 \cdot 95,2 = 3 \cdot 10^5 \quad (10.5)$$

### 1.10.6 Высота ребра (мм)

$$h_p = 0,6 \cdot \sqrt[4]{h^3} = 0,6 \sqrt[4]{255^3} = 36 \quad (10.6)$$

### 1.10.7 Число ребер

$$n_p = 6,4 \cdot \sqrt[3]{h} = 6,4 \sqrt[3]{255} = 12 \quad (10.7)$$

1.10.8 Поверхности выстывания машин с охлаждающим ребром на спинках(мм<sup>2</sup>)

$$S_{\text{маш.р}} = (\pi D_{H1} + 8n_p h_p) \cdot (l_1 + 2l_{B1}) = (\pi \cdot 359 + 8 \cdot 36 \cdot 12) \cdot (136 + 2 \cdot 95,2) = 14,9 \cdot 10^5 \text{ (10.8)}$$

1.10.9 Расчет удельного теплового потока (Вт / мм<sup>2</sup>)

$$p_{n1} = k(P'_{M1} 2l_1 / l_{cp1} + P_{c\Sigma}) / S_{n1} = \frac{0,21 \cdot \left(132 \cdot \frac{2 \cdot 136}{774} + 314\right)}{1,08 \cdot 10^5} = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ (10.9)}$$

1.10.10 Расчет удельного теплового потока в активных частях обмоток (Вт / мм<sup>2</sup>)

$$p_{u.n1} = (P'_{M1} 2l_1 / l_{cp1}) / S_{u.n1} = \frac{132 \cdot \frac{2 \cdot 251}{774}}{3 \cdot 10^5} = 0,79 \cdot 10^{-3} \text{ (10.10)}$$

1.10.11 Расчет удельного теплового потока в лобовой части обмотки (Вт / мм<sup>2</sup>)

$$p_{л1} = (P'_{M1} 2l_{л1} / l_{cp1}) / S_{л1} = \frac{132 \cdot \frac{2 \cdot 251}{774}}{5,9 \cdot 10^5} = 9,6 \cdot 10^{-3} \text{ (10.11)}$$

1.10.12 Круговая скорость (м / с)

$$v_2 = \pi D_{H2} n_1 / 60000 = \frac{\pi \cdot 254 \cdot 1500}{60000} = 19,9 \text{ (10.12)}$$

1.10.13 Увеличение температуры на внутренностях поверхностей активных частей (°C)

$$\Delta t_{n1} = p_{n1} / \alpha_1 = \frac{0,7 \cdot 10^{-3}}{14 \cdot 10^{-5}} = 5 \text{ (10.13)}$$

1.10.14 Скачки температуры (°C)

$$\Delta t_{u.n1} = p_{u.n1} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{\text{эКВ}}} + (b_1 + b_2) / (16 \lambda'_{\text{эКВ}}) \right] = 9,6 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{0,25}{61 \cdot 10^{-5}} + \frac{1+8}{16 \cdot 61 \cdot 10^{-5}} \right) = 1,2 \text{ (10.14)}$$

1.10.15 Увеличение температуры на наружных поверхностях лобовой части ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\Delta t_{л1} = p_{л1} / \alpha_1 = 0,7 \cdot 10^{-3} / 14 \cdot 10^{-5} = 5 \quad (10.15)$$

1.10.16 Скачки температуры ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\Delta t_{u.л1} = p_{u.л1} \cdot \left[ \frac{1}{\lambda_{экр}} + \frac{h_{н1}}{12\lambda'_{экр}} \right] = 0,79 \cdot 10^{-3} \cdot \left( \frac{13,5}{61 \cdot 10^{-5}} + \frac{31}{12 \cdot 130 \cdot 10^{-5}} \right) = 27,3 \quad (10.16)$$

1.10.17 Увеличение средней температуры обмоток ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\Delta t'_1 = \left( \Delta t_{н1} + \Delta t_{u.н1} \right) \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + \left( \Delta t_{л1} + \Delta t_{u.л1} \right) \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} = \left( 6 + 1,2 \right) \cdot \frac{2 \cdot 136}{774} + \left( 6 + 1,2 \right) \cdot \frac{2 \cdot 251}{774} = 6,1 \quad (10.17)$$

1.10.18 Расчет потерь в двигателях с защитой IP44 (Вт)

$$P'_{\Sigma} = k \cdot \left( P'_{м1} \cdot \frac{2l_1}{l_{cp1}} + P_{c\Sigma} \right) + P'_{м1} \cdot \frac{2l_{л1}}{l_{cp1}} + P'_{м2} + 0,1 \cdot P_{мх\Sigma} + P_{\partial} = 0,21 \cdot \left( 132 \cdot \frac{2 \cdot 136}{774} + 314 \right) + 132 \cdot \frac{2 \cdot 251}{774} + 1080 + 0,1 \cdot 123 + 215 = 1575 \quad (10.18)$$

1.10.19 Увеличение средней температуры воздушной массы в машине ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\Delta t_{\epsilon} = P'_{\Sigma} / \left( \rho_{маи} \alpha_{\epsilon} \right) = 1575 / (14,9 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-5}) = 52 \quad (10.19)$$

1.10.20 Преувеличение средней температуры обмоток ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$\Delta t_1 = \Delta t'_1 + \Delta t_{\epsilon} = 6,1 + 51 = 58,1 \quad (10.20)$$

1.10.21 При наибольших допустимых температурах расчет потерь в обмотках (Вт)

$$P'_{M2} = m_1 (I_2'')^2 m_T' r_2'' = 3 \cdot 18^2 \cdot 1,22 \cdot 0,14 = 166 \quad (10.21)$$

1.10.22 Расчет самого большого разрешенного диаметра (мм)

$$D_{корп} = 2(h - h_1) = 2 \cdot (200 - 66) = 388 \quad (10.22)$$

1.10.23 Коэффициент, учитывающий изменения отдачи тепла

$$k_2 = 2,2 \cdot \sqrt[4]{(n_1/1000)^3} \cdot \sqrt{D_{корн}/100} = 2,2 \cdot \sqrt[4]{(500/1000)^3} \cdot \sqrt{388/100} = 5,93 \quad (10.23)$$

1.10.24 Нужное количество расходуемого воздуха у машин с защитой IP44 (м<sup>3</sup>/с)

$$V_в = k_2 P'_\Sigma / (c_в \Delta t_в) = 5,93 \cdot 1575 / (1100 \cdot 2 \cdot 52) = 0,08 \quad (10.24)$$

1.10.25 Количество расходуемого воздуха, в котором нуждается наружный вентилятор (м<sup>3</sup> / с)

$$V'_в \approx 0,6 \cdot (n_1/1000) \cdot (D_{корн}/100)^3 \cdot 10^{-2} = 0,6 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right) \cdot \left(\frac{388}{100}\right)^3 \cdot 10^{-2} = 0,52 \quad (10.25)$$

1.10.26 Максимальный напор от наружного вентилятора (Па)

$$H \approx 12,3 \cdot (n_1/1000)^2 \cdot (D_{корн}/100)^2 = 12,3 \cdot \left(\frac{1500}{1000}\right)^2 \cdot \left(\frac{388}{100}\right)^2 = 297,7 \quad (10.26)$$

1.11 Масса всего двигателя и расчет динамического момента

1.11.1 Расчет массы всех проводов с изоляцией в статоре (кг)

$$m_{м1} = \left[ 7,55 + 1,35 \cdot \left(\frac{U}{d}\right)^2 \right] \cdot z_1 \cdot \frac{N_{м1}}{2} \cdot l_{ср1} \cdot c_s \cdot 10^{-6} = \left[ 7,55 + 1,35 \cdot 6,8^2 \right] \cdot 54 \cdot \frac{11}{2} \cdot 774,6 \cdot 1,368 \cdot 10^{-6} = 16 \quad (11.1)$$

1.11.2 Расчет массы алюминиевых частей, которые имеет короткозамкнутый ротор (кг)

$$m_{ал2} = 2,7 \cdot \left[ 2 s_{cm} l_2 + 2\pi D_{кл.ср} s_{кл} + 1,1 N_l \cdot (l_{кл} - l_{л}) \cdot h_l b_l \right] \cdot 10^{-6} = 2,7 \cdot \left[ 51 \cdot 199,5 \cdot 136 + 2\pi \cdot 156,2 \cdot 678 + 1,1 \cdot 11 \cdot (44 - 11,5) \cdot 26 \cdot 3 \right] \cdot 10^{-6} = 4,7 \quad (11.2)$$

1.11.3 Суммарный расчет массы частей сердечника в статоре, и в роторе (кг)

$$m_{c\Sigma} = 7,8l_1 k_c \times \left[ 0,785 \cdot (D_{H1}^2 - D_2^2) - z_1 s_{n1} - z_2 s_{n2} - \frac{\pi d_{K2}^2}{4} \cdot n_{K2} \right] \cdot 10^{-6}$$

$$= 7,8 \cdot 136 \cdot 0,97 \cdot [0,785 \cdot (254^2 - 82^2) - 54 \cdot 137 - 51 \cdot 95,5 - 0] \cdot 10^{-6} = 34 \quad (11.3)$$

1.11.4 Расчет массы всех изоляций в статоре (кг)

$$m_{u1} = 1,35 \cdot (1 + 20) \cdot (h_{n1} + 3b_n) \cdot b_{u1} z_1 \cdot 10^{-6} = 1,35 \cdot (1136 + 20) \cdot (2 \cdot 31 + 3 \cdot 8,5) \cdot 0,25 \cdot 10^{-6} = 0,27 \quad (11.4)$$

1.11.5 Расчет массы всех конструктивных изделий в двигателе с защитой IP44 (кг)

$$m_K = \left[ (0,55 \div 0,75) \cdot D_{H1}^2 l_1 + (0,3 \div 3,1) \cdot D_{H1}^3 \right] \cdot 10^{-6} = (0,6 \cdot 359^2 \cdot 136 + 2,5 \cdot 359^3) \cdot 10^{-6} = 126 \quad (11.5)$$

1.11.6 Масса двигателя с короткозамкнутым ротором (кг)

$$m_{ДВ} = m_{M1} + m_{ал2} + m_{c\Sigma} + m_{И1} + m_K = 16 + 4,7 + 34 + 0,27 + 126 = 181 \quad (11.6)$$

1.11.7 Расчет приближенного значения динамического момента (кг·м<sup>2</sup>)

$$J_{И.Д} = (0,55 \div 0,65) \cdot D_{H2}^4 l_2 \cdot 10^{-12} = 0,6 \cdot 254^4 \cdot 136 \cdot 10^{-12} = 0,3 \quad (11.7)$$

## 2 Технология сборки асинхронного двигателя

Сборка асинхронного двигателя включает в себя: монтаж подшипников, ввод ротора в статор, запрессовку подшипниковых щитов, измерение воздушных зазоров.[11]

Сердечник статора и ротора изготавливается из электротехнической стали толщиной 0,5 мм, сердечник делают без вентиляционных каналов. Для изоляции пользуются лакировкой.

Магнитопровод ротора насаживается на гладкий вал. Собранный магнитопровод прессуют. Затем на вал насаживаются шарикоподшипники. Подшипники закрепляют на валу стопорным кольцом или гайкой. После того, как ротор был введен в статор, в подшипники закладывают консистентную смазку.[13]

После этого происходит установка переднего фланца и фиксируется в нем подшипник ротора. Затем устанавливается задний подшипниковый щит.[14]

После этого на задний конец вала устанавливается крыльчатка вентилятора, и затем, для защиты вентилятора, устанавливают на него кожух.[15]

Окончательным этапом сборки, является установка клейменной коробки.

На корпус АД, при помощи болтов, на коробку выводов крепится верхняя крышка.[24]

### 3 Анализ себестоимости и окупаемости данного двигателя

По исходным данным бакалаврской работы были рассчитаны:

- расходы на начальное сырье и комплектующие изделия двигателя, которые составили 36628 рублей.

- затраты на закупные материалы, которые составили 2056 рублей.

- основная оплата рабочего труда производственного цеха, которая составила 4066 рублей.

- дополнительная оплата рабочего труда производственного цеха, которая составила 325 рублей.

- расходы на пользование и поддержание рабочих функций двигателя, которые составили 8783 рублей.

- расходы на производство за время изготовления двигателя, которые составили 10941 рублей.

- заводские расходы, которые составили 12199 рублей.

- расходы за транспортировки и доставки оборудования, которые составили 2385 рублей.

Себестоимость электродвигателя составит 81886 рублей, а оптовая цена 102358 рублей соответственно.

Также из расчетов, которые были проведены, выяснилось, что полная окупаемость двигателя произойдет через 1 год и 8 месяцев, что является подтверждением экономической целесообразности проектного варианта.

#### 4 Требования безопасности изготовления двигателя

Опасными факторами являются те факторы, при которых налаженные действия работников могут привести к травмам, либо заболеваниям.[16]

Вследствие механических обработок двигателя, самым первым условием устранения для рабочего опасных факторов является достаточное и непосредственное освещение рабочего места каждого сотрудника. Требовательно, чтобы все рабочие места были освещены для хорошей видимости приборов и деталей. Вследствие тусклого освещения могут возникнуть проблемы при обработке двигателя, а также невнимательность человека при плохом освещении может привести к серьезным травмам и последствиям. Из этого стоит сделать вывод, что на предприятии осветительные приборы не должны быть тусклыми и ярким, создавать тени и бликов на рабочей поверхности.

Сконцентрироваться стоит на предотвращении получения травматизма при работе. К основным станкам и приборам для предоставления необходимой безопасности работающего лица и контролирующего персонала, требуется дополнительно продумать защитные приспособления. Подвижные части станков должны быть огорожены. Также стоит огородить опасные зоны у оборудования. К примерам можно отнести следующие, вращающиеся части станков и механизмов требуется закрыть кожухами, которые в свою очередь будут прикреплены накрепко к станине, на токарных станках для безопасности лица во время работы устанавливают прозрачные защитные щитки или работу проводят в защитных маске или очках. Во время выполнения сверлильных либо фрезерных работ возникают опасности захвата рабочей одежды. Рабочая форма должна быть не широкой, но свободной, под головным убором должны находиться волосы.[18]

#### Экологическая составляющая

Для оптимальной работы рабочего требуется чистый воздух, имеющий оптимальную температуру и определенное количество химического состава в воздухе.

Температура воздуха для оптимальной работоспособности человека равна 19-25° С.

На предприятии поток воздушных масс не должен быть больше 0.2-1,0м/с.

Для работы на современных станках при механической обработке двигателя требуется освещение, составляющее приблизительно 1500 лк.[19]

При соблюдении на рабочей зоне выше указанных требований, процесс работы будет проходить безопасно и обеспечит требуемую работоспособность в цеху.

## Заключение

В данной бакалаврской работе был спроектирован асинхронный электродвигатель серии 4А промышленного производства мощностью 22 кВт со следующими параметрами:

- диаметр внутренней расточки магнитопровода статора 255 мм; эффективная длина магнитопровода статора 136 мм ;

- обмотка у статора с трапецеидальными полузакрытыми пазами, высота паза

31 мм; большая ширина паза 11 мм; меньшая ширина паза 8 мм; кол-во пазов сердечника статора 54; кол-во витков в обмотке фазы 99;

- обмотка у ротора с овальными полузакрытыми пазами, высота паза 49 мм; больший радиус паза 3,4 мм; меньший радиус паза 0,69 мм; внешний диаметр ротора 254 мм; кол-во пазов 51;

- электродвигатель имеет ширину 510 мм; высоту 571 мм; длину 474 мм; расстояние между крепежными отверстиями по длине 235 мм; по ширине 395 мм; диаметр вала 64 мм; вылет вала 80 мм; высота оси вращения 250 мм.

При проведении теплового расчета было установлено, что температурный режим машины соответствует выбранному классу изоляции F и превышения температуры отдельных частей машины не превышает допустимых значений.

В результате проведения вентиляционного расчета определен напор вентилятора  $H=297,7$  Па и действительный расход воздуха  $V_g=0,52$  м<sup>3</sup>, который превышает требуемый расход воздуха  $V_g=0,08$  м<sup>3</sup>, что достаточно для охлаждения двигателя.

При проведении расчета масс были определены массы отдельных частей и масса всего двигателя, которая составила 181 кг.

При анализе себестоимости и окупаемости выяснилось, что полная окупаемость двигателя произойдет через 1 год и 8 месяцев, что является подтверждением экономической целесообразности проектного варианта.

## Список использованных источников

1. Гольдберг, О.Д, Гурин Я.С., Свириденко И.С. Проектирование электрических машин / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высш. Шк., 2008. – 431 с.
2. Алексеев, А.Е. Конструкция электрических машин : учеб. Пособие для энергетических и электротехн. Вузов и фак./ А.Е. Алексеев. – М.: Энергия, 2006. – 427 с.
3. Петунин, Ю.П. Электродвигатель асинхронный. Альбом чертежей / Ю.П. Петунин, А.В. Жуков. – Тольятти: ТГУ, 2009. – 38 с.
4. Кравчик, А.Э. Асинхронный двигатель серии 4А: Справочник / А.Э. Кравчик. – М.: Энергоиздат, 2006. – 504 с.
5. Абрамов, А.И. Проектирование гидрогенераторов и синхронных компенсаторов / А.И. Абрамов, А.В. Смоленский. – М.: Высшая школа, 2006. – 312 с.
6. Петров, В.М. Асинхронные двигатели общего назначения/ В.М. Петров, А.Э. Кравчика. – М.: Энергия, 2008. – 488с.
7. Гольдберг, О.Д. Надежность электрических машин общепромышленного и бытового назначения / О.Д. Гольдберг – М.: Академия, 2010. – 55 с.
8. Гурин, Я.С. Проектирование серии электрических машин / Я.С. Гурин, Б.И. Кузнецов. – М.: Энергия, 2008. – 479 с.
9. Домбровский, В.В. Основы проектирования электрических машин переменного тока / В.В. Дубровский, Г.М. Хуторецкий. – М.: Энергия, 2006. – 503 с.
10. Копылов, И.П. Применение вычислительных машин в инженерно-экономических расчетах / И.П. Копылов. – М.: Высшая школа, 2008. – 258 с.
11. Тихомиров, П.М. Расчет трансформаторов / П.М. Тихомиров. – М.: Энергия, 2006. – 544 с.
12. Антонов М.В. Технология сборки электрических машин и аппаратов: Учебник для СПТУ/М.В. Антонов. – М.: Высшая школа, 1989. – 342 с.

13. Мягков, В.Д. Допуски и посадки: справочник. –В 2 ч. / В.Д. Мягков [ и др. ]. – 6-е изд., перераб. И доп. – М.: Машиностроение, 2006. – Ч.1. 543 с.– Ч. 2. 448 с.
14. Орлов, П.И. Основы конструирования: Справочник-методическое пособие. В 2-х кн. / П.И. Орлов; Под ред. П.Н. Учаева. – изд. 3-е испр. – М.: Машиностроение, 2008. – Кн. 1. 560 с.: ил., Кн. 2. 544 с.: ил.
15. Umesh C. High starting torque induction motor. Gupta, Vickers, Inc., 2008.
16. Alger, P.L. & Arnold, R.E. The History of Induction Motors in America. PROC, Inc., 2008.
17. Thomas H . Multi-phase induction motors. Lancashire Dynamo & Crypto Ltd., 2010.
18. Del Toro, V. Electric Machines and Power Systems. Englewood Cliffs, NJ Prentice-Hall, Inc., 2007.
19. Nasar, S. A. & Unnewehr, L. E. Electromechanic and Electric Machines. New York John Wiley & Sons, Inc., 2006.
20. Асинхронные электродвигатели [Электронный ресурс] /Режим доступа: [http://www.induction.ru/library/book\\_003/9.html](http://www.induction.ru/library/book_003/9.html).- (Дата обращения: 23.05.2016).
21. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://electrono.ru/elektricheskie-mashiny-peremennogo-toka/76-asinxronnyj-dvigatel-s-korotkozamknutym-rotorom> (Дата обращения: 15.03.2016).
22. Асинхронные машины [Электронный ресурс] /Режим доступа: <http://model.exponenta.ru/electro/0080.htm>.- (Дата обращения: 5.04.2016).
23. Асинхронная машина [Электронный ресурс] /Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%BC%D0%B0%D1%88%D0%B8%D0%BD%D0%B0).- (Дата обращения: 16.03.2016).

24. Трехфазный асинхронный двигатель: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://engineering-solutions.ru/motorcontrol/induction3ph/>. (Дата обращения: 16.03.2016).