

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт _____ электронного обучения _____
Направление подготовки (специальность) 140601.65 _____ Электромеханика _____
Кафедра Электротехнических комплексов и материалов _____

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

Тема работы
Проектирование асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором для привода вентилятора

УДК 621.313.333.2

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
К-7302	Мамонов Л. О.		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гирник А. С.	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ст. преподаватель	Кузьмина Н. Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Сечин А. А.	к.т.н., доцент		

По разделу «Технологическая часть»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Баранов П. Р	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ЭКМ	Гарганеев А.Г.	д.т.н., профессор		

Томск – 2016 г.

Задание на ВКР (лист 1)

Задание на ВКР (лист 2)

Министерство образования и науки Российской Федерации
 Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



Институт электронного обучения
 Направление подготовки (специальность) 140601.65 Электромеханика
 Кафедра __Электротехнических комплексов и материалов
 Уровень образования – дипломированный специалист
 Период выполнения – осенний/весенний семестр 2015/2016 учебного года

Форма представления работы:

дипломный проект

**КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
 выполнения выпускной квалификационной работы**

Срок сдачи студентом выполненной работы:	9.06.2016 г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
25.05.2014 г.	Основная часть	60
27.05.2014 г.	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
30.05.2014 г.	Социальная ответственность	20

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гирник А. С.	к.т.н., доцент		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Учёная степень, звание	Подпись	Дата
ЭКМ	Гарганеев А.Г.	д.т.н., профессор		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 127 стр., 19 рисунков, 18 таблиц. Графическая часть содержит 6 листов формата А3. Количество использованных источников литературы: 20.

Объектом проектирования является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для привода вентилятора.

В процессе работы спроектирован асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором для привода вентилятора. Выбраны главные размеры, рассчитаны обмотка статора, ротор, магнитная цепь, потери, рабочие и пусковые характеристики, произведен механический расчет вала и тепловой расчет двигателя. Также разработана механическая обработка подшипникового щита, рассчитана экономические показатели спроектированного двигателя, оценена безопасность и экологичность проекта.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2013, расчеты выполнены в системе компьютерной алгебры MathCAD 14, чертежи в графическом редакторе T-FLEX CAD 14.

Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе используются следующие термины с соответствующими определениями:

асинхронный двигатель: электрическая машина переменного тока, частота вращения ротора которой не равна (в двигательном режиме меньше) частоте вращения магнитного поля, создаваемого током обмотки статора;

технологический процесс: это упорядоченная последовательность взаимосвязанных действий, выполняющихся с момента возникновения исходных данных до получения требуемого результата;

размерный анализ технологического процесса: выявление и фиксирование размерных связей между переходами и операциями конкретного технологического процесса;

маршрутная карта: это технологический документ, содержащий описание технологического процесса изготовления или ремонта изделия (включая контроль и перемещения) по всем операциям различных видов работ в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных и трудовых нормативах в соответствии с установленными нормами;

технологические схемы сборки: графическое изображение последовательности сборки сборочных единиц (узлов) и изделий.

Оглавление

Введение.....		9
1 Электромагнитный расчет.....		11
1.1	Выбор главных размеров	11
1.2	Расчёт обмотки статора	12
1.3	Расчёт размеров зубцовой зоны статора	16
1.4	Расчёт ротора	19
1.5	Расчёт магнитной цепи	24
1.6	Расчёт параметров рабочего режима	27
1.7	Расчёт потерь	33
1.8	Расчёт рабочих характеристик	37
1.9	Расчёт пусковых характеристик	40
1.10	Вывод по главе 1.....	46
2 Тепловой расчет.....		48
2.1	Вывод по главе 2.....	50
3 Вентиляционный расчет.....		51
3.1	Вывод по главе 3.....	51
4 Механический расчет.....		57
4.1	Вывод по главе 4.....	58
5 Специальная часть. Однофазный режим работы трехфазного двигателя.....		59
5.1	Расчет номинального режима.....	65
5.2	Расчет вспомогательной обмотки.....	66
5.3	Расчет пускового режима.....	70
5.4	Вывод по главе 5.....	73
6 Технологическая часть. Технологический процесс общей сборки асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....		75
6.1	Введение. Постановка задачи.....	75
6.2	Служебное назначение и описание конструкции двигателя....	76
6.3	Оценка технологичности конструкции	77
6.4	Размерный анализ конструкции двигателя	79
6.5	Составление схемы сборки и маршрутной технологии общей сборки электрической машин	86

6.6	Расчет норм времени и количества оборудования.....	87
6.7	Вывод по главе 6.....	92
7 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....		93
7.1	Формирование плана и графика разработки проекта.....	93
7.2	Составление сметы затрат на проектирование.....	95
7.3	Оценка технологичности проекта.....	95
8 Социальная ответственность.....		98
8.1	Анализ опасных и вредных факторов.....	104
8.2	Техника безопасности.....	105
8.3	Производственная санитария.....	106
8.4	Расчет искусственного освещения.....	107
8.5	Микроклимат.....	112
8.6	Пожарная безопасность.....	115
8.7	Чрезвычайная ситуация.....	119
8.8	Охрана окружающей среды.....	122
Заключение.....		125
Список используемых источников литературы.....		127
ПРИЛОЖЕНИЕ А.		129
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.		130
ПРИЛОЖЕНИЕ В.		132
ПРИЛОЖЕНИЕ Г.		135
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.		142
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.		143

Введение

Асинхронные машины – самые известные электрические машины. Особенно широко они применяются как электродвигатели и являются основными преобразователями электрической энергии в механическую. Применение асинхронных двигателей в качестве электропривода подавляющего большинства механизмов объясняется простотой конструкции и надёжностью.

В условиях развития современной энергетики существует ряд актуальных проблем, которыми необходимо задаваться проектировщикам электрических машин. Главными задачами, которые ставятся перед инженерами и разработчиками являются следующие задачи.

1. Сбережение электроэнергии потребляемой электроприводами либо системами, в которых работает двигатель.

2. Достижение максимальных параметров качества и надёжности.

Главные тенденции развития отделения власти говорят, что это исторически развивалось так, чтобы для улучшения параметров электрических машин проектировщики сделали акцент на изменении параметров и изменении индикаторов показателей разработанных машин.

Сегодня возможно утверждать, что Россия, а также целый мир, используют новые методы проектирования, используются автоматизированные технические системы, учитываются экономические показатели и технологические размеры при проектировании.

Асинхронные двигатели предназначены для привода вентиляторов типа ВГПМ – 20 вытяжной шахты механической системы вентиляции промышленных помещений, питающихся от сети переменного тока напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Данные двигатели должны удовлетворять следующим требованиям:

- наличие хорошей вентиляции,
- способность к перегрузочным режимам работы,

- максимальная надежность в условиях работы.

Особенности проектируемого двигателя – предполагается сварная конструкция станины, короткозамкнутая обмотка ротора, выполненная из меди с припаянными к ней короткозамыкающими кольцами.

Конструкция сварной станины значительно облегчает вес всего двигателя, дает возможность ремонта станины при её механических повреждениях либо отколе одной или нескольких частей.

Короткозамкнутая обмотки ротора из меди позволит уменьшить номинальное скольжение двигателя и тем самым улучшить его энергетические показатели.

1 Электромагнитный расчет

1.1 Выбор главных размеров

Выбираем предварительно по табл.6.6, [1] для $h = 132$ мм внешний диаметр статора

$$D_a = 225 \text{ мм.}$$

Определяем внутренний диаметр статора

$$D = K_D \cdot D_a,$$

где K_D – коэффициент, характеризующий отношение внутренних и внешних диаметров сердечников статора. Из табл.6.7, [1] выбираем $K_D = 0,66$

$$D = 0,66 \cdot 225 = 149 \text{ мм.}$$

Находим полюсное деление по формуле

$$\tau = \frac{\pi \cdot D}{2p} = \frac{3,14 \cdot 149}{4} = 117 \text{ мм.}$$

Расчетная мощность

$$P' = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi},$$

где P_2 – мощность на валу двигателя, Вт; k_E – отношение ЭДС обмотки статора к номинальному напряжению по рис. 6.8, [1], $k_E = 0,97$; η и $\cos \varphi$ – примерное значение КПД и коэффициент мощности по рис. 6.9, [1] $\eta = 0,87$ и $\cos \varphi = 0,86$

$$P' = 7500 \cdot \frac{0,97}{0,87 \cdot 0,86} = 10370 \text{ Вт}$$

Электромагнитные нагрузки (предварительно) по рис. 6.11, [1]

$$A = 27 \cdot 10^3 \text{ А/м; } B_\delta = 0,89 \text{ Тл}$$

Обмоточный коэффициент (предварительно)

$$k_{o\delta 1} = 0,96$$

Расчетная длина магнитопровода

$$l_\delta = \frac{P'}{k_B \cdot D^2 \cdot \Omega \cdot k_{o\delta 1} A B_\delta}$$

где Ω – синхронная угловая скорость двигателя по формуле

$$\Omega = 2\pi \cdot \frac{f}{p} = 2\pi \cdot \frac{50}{2} = 157,1 \text{ рад/с},$$

$$l_{\delta} = \frac{10370}{1,11 \cdot 0,149^2 \cdot 157,1 \cdot 0,96 \cdot 27 \cdot 10^3 \cdot 0,89} = 0,117 \text{ м}$$

Критерием правильности выбора главных размеров D и l_{δ} служит отношение $\lambda = l_{\delta}/\tau$, которое должно находиться в пределах показанных на рис. 6.14, [1]

$$\lambda = \frac{l_{\delta}}{\tau} = \frac{0,117}{0,117} = 1,0$$

Полученное значение находится в допустимом пределе [0,8-1,4].

Для расчёта магнитной цепи помимо длины воздушного зазора необходимо определить полную конструктивную длину и длину стали сердечников статора и ротора. Так как длина сердечника не превышает 250-300 мм, то радиальных вентиляционных каналов не делают. Сердечники шихтуются в один пакет. Для такой конструкции конструктивная длина и длина стали сердечника статора равна.

$$l_1 = l_{cm1} = l_{\delta} = 0,117 \text{ м}$$

Конструктивную длину сердечника ротора берём равной длине сердечника статора

$$l_2 = l_1 = 0,117 \text{ м}$$

1.2 Расчёт обмотки статора

При вычислении обмотки статора число канавок статора определено числом в раундах в фазе обмотки и разделе проводника. Одновременно число раундов фазы обмотки статора должно быть таково, что линейная нагрузка механизма и индукция в воздушном зазоре совпала с их значениями, принятыми ранее по выбору основных размеров как можно больше, закрываются, и число канавок статора обеспечило довольно равномерное распределение обмоток обмотки.

Число пазов статора выбираем с учётом условий, налагаемых требованиями симметрии обмотки, и желательно получения целого числа пазов на полюс и фазу. В то же время нужно учесть проведённые предварительные расчёты, из которых следует вывод, что мы не можем принять число пазов большим т.к. это приведёт к увеличению магнитной индукции в зубце статора и негативно отразится на энергетических показателях двигателя и на кратности пускового момента, что в нашем случае недопустимо. В проведённых предварительных расчетах мы варьировали числом пазов статора руководствуясь приведенными соображениями (1, с. 170) и пришли к выводу, что наиболее приемлемое число пазов статора равно 36.

Выберем предельные значения зубцового деления t_{Z1} , зависит от h и τ

$$t_{Z1min} = 0,011 \text{ м} ; \quad t_{Z1max} = 0,013 \text{ м}$$

Возможное число пазов статора Z_1

$$Z_{1min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1max}} = \frac{3,14 \cdot 0,149}{0,013} = 35,88$$

$$Z_{1max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{Z1min}} = \frac{3,14 \cdot 0,149}{0,011} = 42,4$$

Принимаем $Z_1 = 36$

Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{Z_1}{2p \cdot m} = \frac{36}{4 \cdot 3} = 3$$

Зубцовое деление статора (окончательно)

$$t_1 = \frac{\pi \cdot D}{2p \cdot q \cdot m} = \frac{\pi \cdot 0,149}{4 \cdot 3 \cdot 3} = 0,013 \text{ м}$$

Число эффективных проводников в пазу (при, условии, что число параллельных ветвей $a=1$) по формуле

$$u_n' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{ном} \cdot Z_1},$$

где $I_{1ном}$ – номинальный фазный ток по формуле 6.18 [1]

$$I_{1ном} = \frac{P_2}{m \cdot U_{1ном} \cdot \eta \cdot \cos \varphi} = \frac{7500}{3 \cdot 220 \cdot 0,87 \cdot 0,86} = 16,2 \text{ А},$$

отсюда $u_n' = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1ном} \cdot Z_1} = \frac{\pi \cdot 0,149 \cdot 27 \cdot 10^3}{16,2 \cdot 36} = 21,6 \approx 22$

Принимаем число параллельных ветвей $a=1$, тогда число эффективных проводников в пазу будет равно

$$u_n = a \cdot u_n' = 1 \cdot 22 = 22$$

Окончательное число витков в фазе по формуле

$$w_1 = \frac{u_n \cdot Z_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{22 \cdot 36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 132$$

Окончательное значение линейной нагрузки по формуле

$$A = \frac{2 \cdot I_{1ном} \cdot w_1 \cdot m}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 16,2 \cdot 132 \cdot 3}{\pi \cdot 0,149} = 27,5 \cdot 10^3 \text{ А/м}$$

Значения A незначительно отличается от принятого ранее значения.

Магнитный поток

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_1}{4 \cdot k_B \cdot w_1 \cdot k_{об1} \cdot f_1} = \frac{0,97 \cdot 220}{4 \cdot 1,11 \cdot 132 \cdot 0,96 \cdot 50} = 0,0076 \text{ Вб},$$

Индукцию в воздушном зазоре рассчитаем по формуле

$$B_\delta = \frac{\rho \cdot \Phi}{D \cdot \ell_\delta} = \frac{2 \cdot 0,0076}{0,149 \cdot 0,117} = 0,874 \text{ Тл}.$$

Сечение эффективного проводника можно определить, зная данные одной параллельной ветви и допустимой плотности тока в обмотке. Плотность тока должна выбираться наибольшей для повышения использования активных материалов. Однако при этом могут возрасти потери в меди обмотки. Это в последующем может отразиться на увеличении температуры обмотки, а так же коэффициенте полезного действия разрабатываемой машины. В асинхронных механизмах общей цели в случае системы косвенного охлаждения, принятого в них, влияние плотности тока при нагревании обмотки более важно, чем на эффективности работы. Нагревание формирующей канавки части обмотки зависит от работы нагрузки на погонную единицу длины плотности тока. Таким образом

выбирать допустимое значение плотности тока следует с учётом линейной нагрузки.

Плотность тока по формуле

$$J_1 = \frac{AJ}{A} = \frac{190 \cdot 10^9}{27,5 \cdot 10^3} = 6,908 \cdot 10^6 \text{ A/м}^2$$

где $A \cdot J$ – произведение линейной нагрузки на плотность тока, рис.6.16,а [1];

$$A \cdot J = 190 \cdot 10^9 \text{ A}^2/\text{м}^3$$

Сечение проводника эффективного (сначала по формуле 6.24 из [1])

$$q_{эф} = \frac{I_{ном}}{a \cdot J_1} = \frac{16,2}{1 \cdot 6,908 \cdot 10^6} = 2,345 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

Для насыпных обмоток можно использовать обмоточные провода диаметром не более 1,8 мм, но в двигателях современных для увеличения надежности обмотки и упрощения её укладки в пазы используют провода меньшего диаметра. При ручной укладке диаметр провода не должен превышать 1,7 мм. В случае, когда полученное значение сечения проводника эффективного в двигателях со насыпной обмоткой выше указанных значений диаметра, тогда расчетный эффективный проводник делят на несколько элементарных $n_{эл}$.

По таблице П-28 [1] выбираем провод ПЭТВ:

$$d_{эл} = 1,25 \text{ мм}, d_{из} = 1,33 \text{ мм}, q_{эл} = 1,227 \text{ мм}^2, n_{эл} = 2.$$

Плотность тока (окончательно)

$$J_1 = \frac{I_{1н}}{a \cdot q_{эл} \cdot n_{эл}} = \frac{16,2}{1 \cdot 1,227 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 6,602 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{м}^2}$$

Схема трехфазной обмотки статора представлена в Приложении А.

Концентрические обмотки единственного слоя характерны факт, что катушки, формирующие каждую группу катушки, концентрические, т.е. покрывают друг друга. Поэтому размеры катушек в группе катушки различные также по длине и по ширине. Кроме того, различна длина катушек, принадлежащих соседним катушечным группам – «малым» и «большим». Лобовые части катушек, образующих большие и малые

катушечные группы, располагаются в двух разных плоскостях, поэтому такая обмотка называется двух плоскостной. Для однослойных концентрических обмоток число катушечных групп в фазе определено как число пар полюсов двигателя. В четном числе p обмотка оказывается абсолютно симметричной, несмотря на различные размеры катушек, поскольку каждая фаза содержит идентичное число многочисленных и малочисленных групп катушки. В нечетном числе пар полюсов каждая фаза содержит нечетное число групп катушки. Для укладки такой обмотки в двигатель, одну из катушечных групп выполняют «кривой», т. е. одну ее сторону делают по размеру наибольшей группы катушечной, а другую – по малому размеру.

Необходимости установки кривой катушки можно избежать, выполнив эту обмотку по типу трехплоскостной, т. е. расположив лобовые части не в двух, а в трех плоскостях. К схеме трехплоскостной обмотки легко перейти от обычной двухплоскостной при четном q изменив направление отгиба лобовых частей половины катушек v , каждой катушечной группе. Такая обмотка получила название обмотки «вразвалку». Асимметрия фаз в нем (передние части групп катушки каждой из фаз – занимают один определенный слой) – может быть уменьшена, увеличивая сложность укладки. Для этого лобовые части катушек выполняют, длинными с одного торца машины и короткими с другого.

1.3 Расчёт размеров зубцовой зоны статора

Размеры канавок в электрических машинах должны быть выбраны так, чтобы, во-первых, область канавки соответствовала количеству и размерам извилистых проводников, помещенных в него принимающий во внимание всю изоляцию и также чтобы значения индукции в зубах и хомуте статора были в определенных пределах в зависимости от типа, питания, выполнения машины и от марки стали статора.

Ширина зубца

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot \ell_{\delta}}{B_{z1} \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,874 \cdot 0,013 \cdot 0,117}{1,7 \cdot 0,117 \cdot 0,97} = 0,0069 \text{ м},$$

где B_{z1} – индукция в зубцах статора .

Индукцию в зубцах статора принимаем $B_{z1}=1,7 \text{ Тл}$, k_c – коэффициент заполнения пакета сталью по табл. 6.11 [1]; $k_c=0.97$

Высота статорного ярма [1, с.175]

$$h_a = \frac{\Phi}{2 \cdot B_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_{c1}} = \frac{0,0076}{2 \cdot 1,46 \cdot 0,117 \cdot 0,97} = 0,023 \text{ м}$$

где B_a – индукция в ярме статора; предварительно принимаем $B_a=1.46 \text{ Тл}$

Ширину шлица принимаем $b_{u1}=3,5 \text{ мм}$ по табл.6.12 [1]; высоту шлица берем $h_{u1}=0,5 \text{ мм}$ [1, стр.178]

Высота паза [1, стр.178, ф.6.40]

$$h_n = \frac{D_a - D}{2} - h_a = \frac{0,225 - 0,149}{2} - 0,023 = 0,015 \text{ м} = 15 \text{ мм}$$

Максимальная ширина паза по формуле

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_u - b_u) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi \cdot (149 + 2 \cdot 0,5 - 3,5) - 36 \cdot 6,9}{36 - \pi} = 6,4 \text{ мм}$$

Минимальная ширина паза по формуле

$$b_2 = \frac{\pi \cdot (D + 2h_{n1})}{Z_1} - b_{z1} = \frac{\pi \cdot (149 + 2 \cdot 15)}{36} - 6,9 = 13,0 \text{ мм}$$

Высота паза, предназначенная для укладки обмотки по формуле

$$h_1 = h_n - \left(h_{u1} + \frac{b_1 - b_{u1}}{2} \right) = 15 - \left(0,5 + \frac{6,4 - 3,5}{2} \right) = 13,4 \text{ мм}$$

Размеры паза в свету с учётом припуска на сборку по формуле

$$b'_1 = b_1 - \Delta b_n = 6,4 - 0,1 = 6,3 \text{ мм}$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta b_n = 13,0 - 0,1 = 12,9 \text{ мм}$$

$$h'_1 = h_1 - \Delta h_n = 13,4 - 0,1 = 13,3 \text{ мм}$$

Площадь сечения поперечного изоляции корпуса в пазу найдем так

$$S_{uz} = b_{uz} \cdot (2h_n + b_1 + b_2) = 0,35 \cdot (2 \cdot 15 + 6,4 + 13) = 17,5 \text{ мм}^2$$

где b_{uz} – односторонняя толщина изоляции в пазу табл.3.8 [1]: $b_{uz} = 0,35 \text{ мм}$.

Площадь сечения поперечного прокладок [1, стр. 179]. Так как обмотка однослойная то $S_{np} = 0 \text{ м}$. Площадь поперечного сечения паза для размещения проводников формуле

$$S'_n = \frac{b'_1 + b'_2}{2} \cdot h'_1 - (S_{uz} + S_{np}) = \frac{6,3 + 12,9}{2} \cdot 13,3 - (17,5 + 0) = 110,1 \text{ мм}^2$$

Коэффициент заполнения паза [1, стр.180]

$$k_z = \frac{d_{uz}^2 \cdot U_n \cdot n_{эл}}{S'_n} = \frac{(1,33)^2 \cdot 22 \cdot 2}{110,1} = 0,72$$

Полученное значение коэффициента заполнения паза находится в рекомендуемом пределе (0,72–0,74).

Размеры паза статора представлены на рис.1. 1.

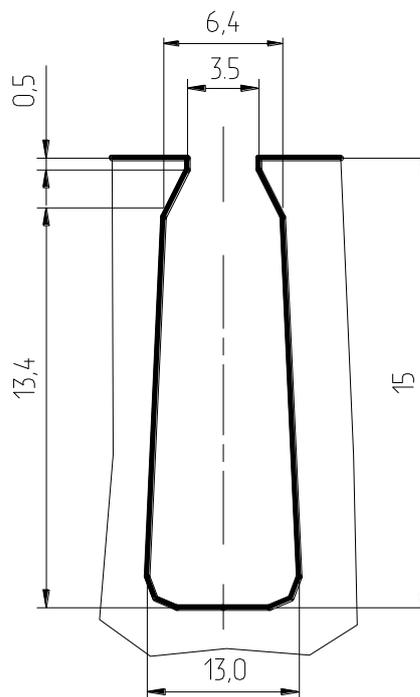


Рисунок 1.1 – Размеры паза статора

1.4 Расчёт ротора

Воздушный зазор следует выбирать, руководствуясь данными выпускаемых двигателей по рис. 6.21 [1].

Показатели энергетики асинхронного двигателя определяются правильностью выбора воздушного зазора. С уменьшением воздушного зазора уменьшается его магнитное сопротивление и магнитное напряжение, которые составляют основную часть суммарной магнитно движущей силы магнитной цепи всего двигателя. Следовательно, при уменьшении зазора уменьшается магнитно движущая сила цепи магнитной и тока намагничивающего всей машины, что приводит к повышению коэффициент мощности и уменьшению потери в меди обмотки статора. Однако сильное уменьшение воздушного зазора может привести к увеличению амплитуд пульсаций индукции в воздушном зазоре и, в связи с этим, к увеличению потерь поверхностных и потерь пульсационных. Значит, коэффициент полезного действия двигателей с очень маленькими зазорами не улучшается, а часто даже становится меньше.

В настоящее время зазор в асинхронных двигателях выбирается так, чтобы суммарные потери были минимальными. В связи с этим выбираем $\delta = 0,3$ мм.

Количество роторных пазов определяем по табл. 6.15 [1]. Число пазов ротора следует выбирать особенно тщательно. Это объясняется тем, что в поле воздушного зазора двигателя помимо главной имеются многочисленные гармоники высоких порядков. В связи с этим, в стержнях обмотки ток описывается сложным гармоническим уравнением.

Токи и поля высших гармоник взаимодействуют, что приводит к появлению электромагнитных моментов. Если соотношение Z_1 и Z_2 при этом выбрано неблагоприятно, то механические характеристики двигателя ухудшаться, потому что момент на валу двигателя равно сумме моментов, вызванные всеми взаимодействующими гармониками.

Исследования, проведённые с целью выявления зависимости кривой момента, шумы и вибрации от количества зубцов на статоре и роторе, дают возможность найти наилучшие сочитание Z_1 и Z_2 для короткозамкнутых машин с различными числами $2p$.

Согласно табл. 6.15 [1] при $2p=4$ и $Z_1=36$ принимаем $Z_2=26$.

Диаметр ротора внешний $D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,149 - 2 \cdot 0,0003 = 0,148_m$

Деление ротора зубцовое $t_2 = \frac{\pi \cdot D_2}{Z_2} = \frac{\pi \cdot 0,148}{26} = 0,018_m$

Так как сердечник непосредственно насаживается на гладкий вал при помощи горячей посадки, то внутренний диаметр ротора равен диаметру вала.

$$D_j = D_B = k_B \cdot D_a = 0,23 \cdot 0,225 = 0,052 \text{ м}$$

где k_B – коэффициент по табл. 6.16 [1]; $k_B=0,23$

Ток в стержне ротора по формуле 6. 60 [1]

$$I_2 = k_i \cdot I_1 \cdot \frac{2 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{об1}}{Z_2} = 0,888 \cdot 16,2 \cdot \frac{2 \cdot 3 \cdot 132 \cdot 0,96}{26} = 420,7 \text{ А}$$

где k_i – коэффициент, учитывающий влияние тока намагничивания и сопротивления обмоток на соотношение I_1/I_2 , его приблизительное значение рассчитывается в зависимости от номинального $\cos\varphi$, которым задавались в начале расчета рис. 6. 22 [1]

$$k_i = 0,2 + 0,8 \cdot \cos\varphi = 0,2 + 0,8 \cdot 0,86 = 0,888$$

Площадь поперечного сечения стержня по формуле

$$q_c = \frac{I_2}{J_2} = \frac{420,7}{3,5 \cdot 10^6} = 120,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$$

где J_2 – плотность тока в стержне ротора машин закрытого обдуваемого исполнения при заливке пазов алюминием [1, стр.186]; $J_2=3,5 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$

Паз ротора

Для обеспечения высоких энергетических показателей в номинальном режиме работы, и достаточно высоким пусковым моментом принимаем пазы ротора с узкой нижней частью и немного большей верхней частью паза. Это выполняется для усиления эффекта вытеснения тока в пазу ротора. Паз выполняем грушевидной формы. Размеры паза ротора были определены из предварительных расчётов с учетом технического задания.

По данным из [1, стр.188]: ширина шлица $b_{ш2}=1,0$ мм, высота шлица $h_{ш2}=0,5$ мм.

Ширина зубца ротора

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \ell_{\delta}}{B_{z2} \cdot \ell_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,874 \cdot 0,018 \cdot 0,117}{1,85 \cdot 0,117 \cdot 0,97} = 0,0087 \text{ м}$$

где B_{z2} – индукция в зубцах ротора по табл.6.10 [1]; принимаем $B_{z2}=1,85$ Тл.

Максимальная ширина паза

$$b_1 = \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_{ш} - 2 \cdot h'_{ш}) - Z_2 \cdot b_{z2}}{\pi + Z_2} = \frac{\pi \cdot (148 - 2 \cdot 0,5 - 2 \cdot 0,3) - 26 \cdot 8,7}{\pi + 26} = 8,0 \text{ мм}$$

Минимальная ширина паза по формуле

$$b_2 = \sqrt{\frac{b_1^2 \cdot \left(\frac{Z_2}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - q_c \cdot 4}{\frac{Z_2}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = \sqrt{\frac{8,0^2 \cdot \left(\frac{26}{\pi} + \frac{\pi}{2}\right) - 120,2 \cdot 4}{\frac{26}{\pi} - \frac{\pi}{2}}} = 4,7 \text{ мм}$$

Полная высота паза ротора

$$h_{n2} = h_{ш2} + \frac{b_1}{2} + \frac{b_2}{2} + h_1 = 0,5 + \frac{8}{2} + \frac{4,7}{2} + 13,7 = 20,6 \text{ мм}$$

где по формуле 6.76[1]

$$h_1 = (b_1 - b_2) \cdot \frac{Z_2}{2 \cdot \pi} = (8 - 4,7) \cdot \frac{26}{2 \cdot \pi} = 13,7 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения стержня равно

$$q_c = \frac{\pi}{8} \cdot (b_1^2 + b_2^2) + \frac{1}{2} \cdot (b_1 + b_2) \cdot h_1 = \frac{\pi}{8} \cdot (8^2 + 4,7^2) + \frac{1}{2} \times (8 + 4,7) \cdot 13,7 = 120,8 \text{ мм}^2$$

Размер паза ротора рис. 1.2.

Плотность тока в стержне (окончательно)

$$J_2 = \frac{I_2}{q_c} = \frac{420,7}{120,8 \cdot 10^{-6}} = 3,482 \cdot 10^6 \frac{A}{M^2}$$

Ток в кольце по формуле

$$I_{кл} = \frac{I_2}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot p}{Z_2}} = \frac{420,7}{2 \cdot \sin \frac{\pi \cdot 2}{26}} = 878,9 A$$

Плотность тока в кольце [1, стр.186].

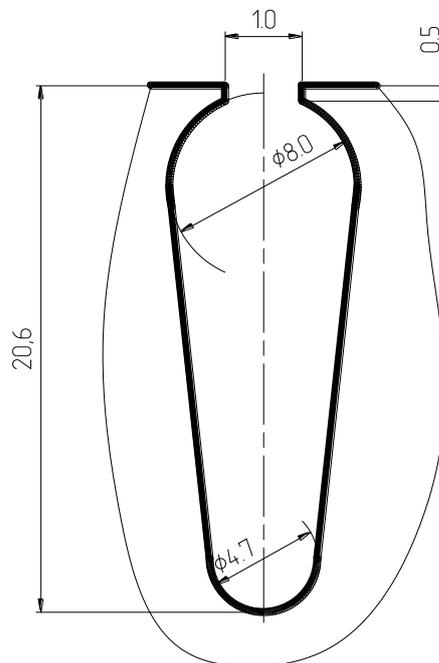


Рисунок 1.2 – Размеры паза ротора

Плотность тока в замыкающих кольцах выбираем на 15 % меньше, чем в стержнях. Это объясняется следующим образом. Так как замыкающие кольца имеют лучшие условия охлаждения, чем стержни, то они могут быть рассмотрены в качестве радиаторов, предназначенных для усиления охлаждения стержней.

$$J_{кл} = 0,85 \cdot J_2 = 0,85 \cdot 3,482 \cdot 10^6 = 2,96 \cdot 10^6 \frac{A}{M^2}$$

Сечение короткозамкнутого кольца по формуле

$$q_{кл} = \frac{I_{кл}}{J_{кл}} = \frac{878,9}{2,96 \cdot 10^6 \cdot 10^{-6}} = 296,9 \text{ мм}^2$$

Высота короткозамкнутого кольца [1, стр.186]

$$h_{кл} = 1,25 \cdot h_{н2} = 1,25 \cdot 20,6 \cdot 10^{-3} = 0,026 \text{ м} = 26 \text{ мм}$$

Длина короткозамкнутого кольца [1, стр.244]

$$a_{кл} = \frac{q_{кл}}{h_{кл}} = \frac{296,9 \cdot 10^{-6}}{0,026} = 0,012 \text{ м}$$

Средний диаметр короткозамкнутого кольца [1, стр. 244]

$$D_{кл.ср} = D_2 - b_{кл} = 0,148 - 0,026 = 0,122 \text{ м}.$$

1.5 Расчёт магнитной цепи

Выполним вычисление тока намагничивания для режима холостого хода механизма, в случае которого сильное насыщение стали зубцов статора и ротора характерна для асинхронных машин.

Индукция в статорных зубцах в окончательном варианте рассчитывается так

$$B_{z1} = \frac{B_{\delta} \cdot t_1 \cdot \ell_{\delta}}{b_{z1} \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,874 \cdot 0,013 \cdot 0,117}{0,0069 \cdot 0,117 \cdot 0,97} = 1,7 \text{ Тл}$$

Индукция в зубцах ротора:

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_2 \cdot \ell_{\delta}}{b_{z2} \cdot \min \cdot \ell_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,874 \cdot 0,018 \cdot 0,117}{0,0088 \cdot 0,117 \cdot 0,97} = 1,829 \text{ Тл}$$

По табл. П.17, [1] стали марки 2013 определяем напряженность магнитного поля зубцов ротора АД:

$$H_{z2} = 1670 \text{ А/м},$$

Индукция в ярме статора (окончательно) по формуле

$$B_a = \frac{\Phi}{2 \cdot h_a \cdot \ell_{cm1} \cdot k_c} = \frac{0,0076}{2 \cdot 0,023 \cdot 0,117 \cdot 0,97} = 1,46 \text{ Тл}$$

Расчётная высота ярма ротора по формуле

$$h_j = \frac{2+p}{3,2 \cdot p} \cdot \left(\frac{D_2}{2} - h_{n2} \right) = \frac{2+2}{3,2 \cdot 2} \cdot \left(\frac{0,148}{2} - 0,0206 \right) = 0,033 \text{ м}$$

Индукция в ярме ротора по формуле

$$B_j = \frac{\Phi}{2 \cdot h_j \cdot \ell_{cm2} \cdot k_c} = \frac{0,0076}{2 \cdot 0,033 \cdot 0,117 \cdot 0,97} = 1,02 \text{ Тл}$$

Коэффициент воздушного зазора [1, стр.106]

Поверхности статора и ротора, которые ограничивают воздушный зазор, являются гладкими, но пазы имеют. В поперечном сечении двигателя сопротивление магнитное подобного зазора различно, что ведет к неравномерному распределению индукции по всей площади воздушного зазора. Самая большая неравномерность появляется в связи с наличием зубцов на статоре и роторе. Линии магнитные над зубцовыми коронками сгущаются, в свою очередь над прорезями пазов плотность этих линий уменьшается. Тогда на кривой, характеризующей индукцию в воздушном зазоре, можно обнаружить провалы. При неравномерной индукции магнитное сопротивление возрастает и увеличивается магнитное напряжение воздушного зазора.

Данный эффект как правило учитывается при введении так называемого коэффициента воздушного зазора. Он получается расчётом полей в зазорах с разным значением ширины зубцов и пазов и указывает, как увеличивается магнитное напряжение зазора с зубчатой поверхностью статора или ротора в сравнении с показаниями данной величины между гладкими поверхностями.

Коэффициент воздушного зазора определяется так: [1]

$$k_{\delta 1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,013}{0,013 - 6,667 \cdot 0,0003} = 1,182$$

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_{u1}}{\delta} \right)^2}{5 + \frac{b_{u1}}{\delta}} = \frac{\left(\frac{0,003}{0,0003} \right)^2}{5 + \frac{0,003}{0,0003}} = 6,667$$

Магнитное напряжение воздушного зазора:

$$F_{\delta} = \frac{2}{\mu} \cdot B_{\delta} \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot 10^6 = 1,59 \cdot 0,874 \cdot 0,0003 \cdot 1,182 \cdot 10^6 = 493,3 A$$

По табл.П.17 [1], для стали марки 2013 определяем напряженность магнитного поля для зубцов АД: $H_{z1} = 1150 A/м$.

$$F_{z1} = 2 \cdot h_{z1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,015 \cdot 1150 = 35,3 A$$

Магнитное напряжение зубцов ротора :

$$F_{z2} = 2 \cdot h_{z2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,0201 \cdot 1670 = 67 A$$

где H_{z2} – напряжённость магнитного поля для стали 2013 $H_{z2} = 1670 A/м$.

Коэффициент насыщения зубцовой зоны равен

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = 1 + \frac{35,3 + 67}{493,3} = 1,207$$

Данное значение коэффициента насыщения зоны зубцовой дает возможность заранее оценить достоверность выбранных соотношений размеров и данных обмотки разрабатываемого двигателя. Если $k_z > 1,5 \div 1,6$, тогда имеем повышенное насыщение зоны зубцовой; если $k_z < 1,2$, тогда зона зубцовая почти не используется или зазор воздушный выбран большим. Длина магнитной линии ярма статора по формуле

$$L_a = \frac{\pi \cdot (D_a - h_a)}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,225 - 0,038)}{4} = 0,177 м$$

Длина магнитной линии ярма ротора по формуле

$$L_j = 2 \cdot h_j = 2 \cdot 0,033 = 0,067 м$$

где h_j – высота спинки ротора.

Магнитное напряжение ярма статора по формуле

$$F_a = L_a \cdot H_a = 0,177 \cdot 464 = 82 A$$

где H_a – напряжённость магнитного поля ярма статора по табл.П.16 [1]; для стали 2013 $H_a = 464 A/м$.

Магнитное напряжение ярма статора по формуле

$$F_j = L_j \cdot H_j = 0,067 \cdot 185 = 12,3 A$$

где H_j – напряжённость магнитного поля ярма ротора по табл.П.16 [1]; для стали 2013 $H_j=185 \text{ А/м}$.

Магнитное напряжение на пару полюсов по формуле

$$F_y = F_\delta + F_{z1} + F_{z2} + F_a + F_j = 493,3 + 35,3 + 67,1 + 82 + 12,3 = 690 \text{ А}$$

Коэффициент насыщения магнитной цепи по формуле

$$k_\mu = \frac{F_y}{F_\delta} = \frac{690}{493,3} = 1,399$$

Намагничивающий ток по формуле

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_y}{0,9 \cdot m \cdot W_1 \cdot k_{\sigma 01}} = \frac{2 \cdot 690}{0,9 \cdot 3 \cdot 132 \cdot 0,96} = 4,0 \text{ А}$$

Относительное значение намагничивающего тока по формуле

$$I_\mu^* = \frac{I_\mu}{I_{ном}} = \frac{4,0}{16,2} = 0,249$$

Относительное значение тока намагничивания позволяет оценить правильность выбора и расчёта размеров и обмотки машины. Если $I_\mu^* < 0,2 \div 0,18$, то это свидетельствует о том, что размеры машины выбраны завышенными и активные материалы недоиспользованы. Данный двигатель может иметь высокие коэффициент полезного действия и $\cos \varphi$, но плохие значения расхода материалов относительно единицы мощности, увеличенную массу и габариты. Если $I_\mu^* > 0,3 \div 0,35$, то это означает, что его габариты взяты более маленькими, чем надо было или соотношения размеров участков магнитопровода выбраны неправильно. Такая машина будет иметь низкие $\cos \varphi$ и коэффициент полезного действия.

1.6 Расчет параметров рабочего режима

Параметры асинхронного двигателя – это активное сопротивление обмотки статора x_1 , индуктивное сопротивление обмотки статора r_1 , активное сопротивление обмотки ротора x_2 , индуктивное сопротивление

обмотки ротора r_2 , сопротивление взаимной индуктивности x_{12} и расчётное сопротивление r_{12} , при вводе которого надо учитывать влияние потерь в стали статора на характеристики двигателя.

Эквивалентные схемы фазы асинхронной машины, известной из общей теории электрических машин, на основе приведения процессов во вращающейся машине к фиксированной (рис. 1.3).

Физические процессы в асинхронной машине более наглядно отражает схема, изображённая на рисунке 1.3а.

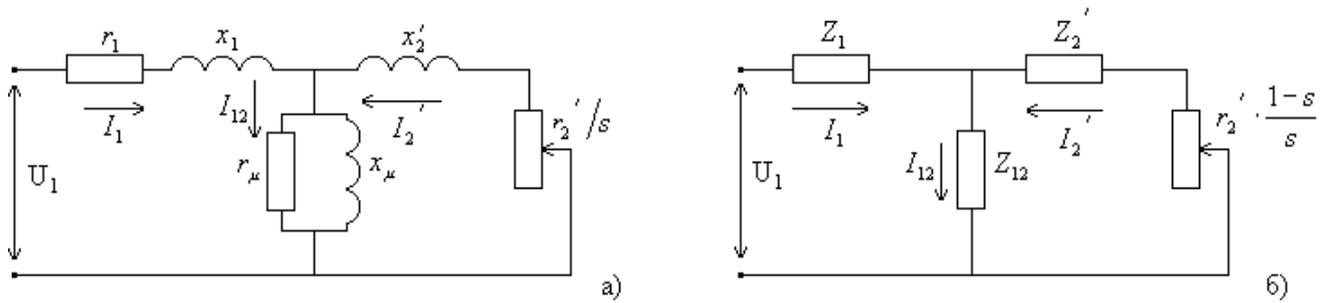


Рисунок 1.3 – Схемы замещения фазы обмотки приведённой асинхронной машины

Но для расчёта оказалось удобнее преобразовать её в схему показанную на рисунке 1.3б.

Параметры эквивалентной схемы не остаются постоянными в различных рабочих режимах машины. С увеличением загрузки дисперсионных потоковых увеличений, и в этом отношении из-за увеличения насыщенности отдельных сайтов магнитного проводника полями дисперсионного индуктивного уменьшаются сопротивления x_1 и x_2 .

Увеличение скольжения в двигателях приводит к увеличению действия эффекта замены тока, который вызывает изменение сопротивления обмотки ротора r_2 и x_2 . Вычисляя рабочие режимы машины в пределах изменения скольжения от холостого хода до номинала, эти изменения незначительны и обычно пренебрегают ими.

Средняя ширина катушки по формуле

$$b_{км} = \frac{\pi \cdot (D + h_{n1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,149 + 0,015)}{4} = 0,117 \text{ м}$$

Лобовая часть катушек имеет сложную конфигурацию. Точный расчёт её длины и длины вылета лобовой части требует предварительного определения всех размеров катушки и сопряжён со значительным объёмом расчётов, данные которых в дальнейшем электромагнитном расчёте обычно не используются. Для машин малой и средней мощности достаточно точные для практических расчётов результаты дают эмпирические формулы, учитывающие главные особенности форм конструкции катушек.

Длина передней части по формуле

$$\ell_n = K_n \cdot b_{км} + 2B = 1,55 \cdot 0,117 + 2 \cdot 0,01 = 0,201 \text{ м}$$

где K_n – коэффициент по табл.6.19 [1], $K_n = 1,55$, B – длина вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части [1, стр.197]; $B = 0,01 \text{ м}$.

Вылет передних частей обмотки по формуле

$$\ell_{вбл} = K_{вбл} \cdot b_{км} + B = 0,5 \cdot 0,117 + 0,01 = 0,068 \text{ м}$$

где $K_{вбл}$ – коэффициент по табл.6.19 [1]; $K_{вбл} = 0,5$

Средняя длина витка обмотки по формуле

$$\ell_{ср1} = 2 \cdot (\ell_{n1} + \ell_n) = 2 \cdot (0,117 + 0,201) = 0,635 \text{ м}$$

где ℓ_n – длина пазовой части; $\ell_n = \ell_1 = 0,117 \text{ м}$

Длина проводников фазы обмотки по формуле

$$L_1 = \ell_{ср1} \cdot W_1 = 0,635 \cdot 132 = 83,9 \text{ м}$$

Активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{115} \cdot \frac{L_1}{q_{эф} \cdot a} = \frac{10^{-6}}{41} \cdot \frac{83,9}{2,345 \cdot 10^{-6} \cdot 1} = 0,872 \text{ Ом}$$

где ρ_{115} – удельное сопротивление материала обмотки по табл.4-1 [1]; для данного класса нагревостойкости изоляции расчётная температура 115°C , для меди $\rho_{115}=10^{-6}/41 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Относительное значение активного сопротивления фазы обмотки статора [1, с.245]

$$r_1^* = r_1 \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 0,872 \cdot \frac{16,2}{220} = 0,064$$

В аналогичных машинах значение сопротивления может достигать значения до 0,08.

Активное сопротивление фазы короткозамкнутого ротора определяется так. Берётся одно ядро и два места заключительных колец для фазы обмотки, запущенной в форме клетки для белок.

Токи в стержнях и замыкающих кольцах отличаются, в связи с этим при вычислении общего фазного сопротивления сопротивления первых должны приводиться к одному току. В итоге, сопротивление фазы короткозамкнутого ротора можно подсчитать, имея во внимание равенства электрических потерь в индуктивном сопротивлении ротора r_2 от тока I_c и суммарных потерь в стержне и участках замыкающих колец реальной машины.

Сопротивление стержня определяется по формуле

$$r_c = \rho_{115} \cdot \frac{\ell_2}{q_c} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{0,117}{120,8 \cdot 10^{-6}} = 4,7 \cdot 10^{-5} \text{ Ом}$$

где ρ_{115} – удельное сопротивление материала обмотки по табл.4-1 [1]; для данного класса нагревостойкости изоляции расчётная температура 115°C , для алюминия $\rho_{115}=10^{-6}/20,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Сопротивление участка замыкающего кольца, заключённого между двумя соседними стержнями [1, с.202 формула 6.166]

$$r_{кл} = \rho_{115} \cdot \frac{\pi \cdot D_{к.ср}}{Z_2 \cdot q_{кл}} = \frac{10^{-6}}{20,5} \cdot \frac{\pi \cdot 0,122}{26 \cdot 296,9 \cdot 10^{-6}} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Активное сопротивление фазы обмотки ротора по формуле

$$r_2 = r_c + \frac{2 \cdot r_{кл}}{\Delta^2} = 47 \cdot 10^{-6} + \frac{2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-6}}{0,479^2} = 68,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}$$

Приводим r_2 к числу витков обмотки статора по формуле

$$r_2' = r_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (W_1 \cdot \kappa_{об1})^2}{Z_2 \cdot K_c} = 68,4 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (132 \cdot 0,96)^2}{26 \cdot 0,97} = 0,507 \text{ Ом}$$

Относительное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора [1, с.245]

$$r_2^* = r_2' \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 0,507 \cdot \frac{16,2}{220} = 0,037$$

В аналогичных машинах значение сопротивления может достигать значения до 0,08.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора по табл.6-22 [1]

$$\lambda_{п1} = \frac{h_2}{3 \cdot b_2} \cdot k_\beta + \left(\frac{h_1}{b_1} + \frac{3 \cdot h_k}{b_2 + 2b_{у1}} + \frac{h_{у1}}{b_{у1}} \right) \cdot k'_\beta = \frac{0,0126}{3 \cdot 0,013} \cdot 1 + \left(\frac{3 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{0,013 + 2 \cdot 0,0035} + \frac{0,0005}{0,0035} \right) \cdot 1 = 1,216$$

где k_β и k'_β – коэффициенты учитывающие укорочение шага обмотки [1, с.199];

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки статора по формуле 6.154 [1]

$$\lambda_1 = 0,34 \cdot \frac{q}{\ell_\delta} \cdot (\ell_\delta - 0,64 \cdot \beta \cdot \tau) = 0,34 \cdot \frac{3}{0,117} \cdot (0,201 - 0,64 \cdot 1 \cdot 0,117) = 1,1$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора по формуле 6.170 [1]

$$\lambda_{д1} = \frac{t_1}{12 \cdot \delta \cdot k_\delta} \cdot \xi = \frac{0,013}{12 \cdot 0,0003 \cdot 1,182} \cdot 1,729 = 5,264$$

где ξ – коэффициент по формуле 6.172 [1]; при полузакрытых или полукрытых пазах статора с учетом скоса пазов:

$$\xi = 2 \cdot \kappa'_{ск} \cdot \kappa_{\beta} - \kappa_{об1}^2 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1}\right)^2 \cdot (1 + \beta_{ск}^2) = 2 \cdot 1,05 \cdot 1 - 0,96^2 \cdot (1,379)^2 = 1,729$$

где $\beta_{ск}$ – коэффициент скоса, выраженный в долях зубцового деления ротора; так как скос пазов на статоре отсутствует, то $\beta_{ск}=0$, $\kappa'_{ск}$ – коэффициент по рис.6-39д [1]; при $t_2/t_1=1,379$ и $\beta_{ск}=0$, $\kappa'_{ск}=1,05$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки статора

$$x_1 = 15,8 \cdot \frac{f}{100} \cdot \left(\frac{W_1}{100}\right)^2 \frac{\ell'_s}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{,1} + \lambda_{л1} + \lambda_{д1}) = 15,8 \cdot \frac{50}{100} \cdot \left(\frac{132}{100}\right)^2 \cdot \frac{0,117}{2 \cdot 3} \cdot (1,216 + 1,1 + 5,264) = 2,033 \text{ Ом}$$

Относительное значение индуктивного сопротивления фазы обмотки статора [1, с. 205]

$$x_1^* = x_1 \cdot \frac{I_{1н}}{U_{1н}} = 2,033 \cdot \frac{16,2}{220} = 0,15$$

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки ротора по табл.6-23 ,[1]

$$\lambda_{л2} = \left[\frac{h_0}{3 \cdot b_1} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot b_1^2}{8 \cdot q_c}\right)^2 + 0,66 \right] \cdot k_{д} + 0,3 + 1,12 \frac{h_{ц2} \cdot 10^{-6}}{I_2} = \left(\frac{0,0162}{3 \cdot 0,0047} \cdot \left(1 - \frac{\pi \cdot 0,008^2}{8 \cdot 120,8 \cdot 10^{-6}}\right)^2 + 0,66 - \frac{0,0035}{2 \cdot 0,0047} \right) \cdot 1 + 0,3 + 1,12 \frac{0,5 \cdot 10^{-6}}{420,7} = 1,282$$

Коэффициент магнитной проводимости лобового рассеяния обмотки ротора по формуле

$$\lambda_{л2} = \frac{2,3 \cdot D_{кл.сп}}{Z_2 \cdot \ell'_s \cdot \Delta^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot D_{кл.сп}}{2 \cdot a_{кл} + b_{кл}} = \frac{2,3 \cdot 0,122}{26 \cdot 0,117 \cdot 0,479^2} \cdot \lg \frac{4,7 \cdot 0,122}{2 \cdot 0,012 + 0,026} = 1,598$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния обмотки статора по формуле

$$\lambda_{д2} = \frac{t_2}{12 \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \cdot \xi = \frac{0,018}{12 \cdot 0,0003 \cdot 1,182} \cdot 1,012 = 4,247$$

где ξ – коэффициент по формуле

$$\xi = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Z_2} \right)^2 - \frac{\Delta_z}{1 - (p/Z_2)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{26} \right)^2 = 1,012$$

где Δ_z находят по кривым по рис.6.39 а, [1]; $\Delta_z = 0$

Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора по формуле $x_2 = 7,9 \cdot f_1 \cdot l_{\delta} \cdot (\lambda_{п2} + \lambda_{л2} \cdot \lambda_{д2} + \lambda_{ск}) \cdot 10^{-6} = 7,9 \cdot 50 \cdot 0,117 \cdot (1,282 + 1,598 + 4,247) \cdot 10^{-6} = 3,3 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}$
Приводим x_2 к числу витков обмотки статора по формуле

$$x_2' = x_2 \cdot \frac{4 \cdot m \cdot (W_1 \cdot K_{об1})^2}{Z_2 \cdot K_{ск}} = 330 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot (132 \cdot 0,96)^2}{26 \cdot 1} = 2,44 \text{ Ом}$$

Относительное значение x_2 [1, с.205]

$$x_2^* = x_2' \cdot \frac{I_{1H}}{U_{1H}} = 2,44 \cdot \frac{16,2}{220} = 0,167$$

Представление параметров асинхронного двигателя в относительные значения делается для того чтобы было удобно сопоставить параметры отдельных двигателей и упростить расчёт его характеристик.

Так, относительные значения индуктивного сопротивления дисперсии обмотки статора и данного сопротивления обмотки ротора главным образом находятся в пределах $x_1^* = 0,08 \div 0,14$ и $x_2^* = 0,1 \div 0,16$.

Относительные значения активного сопротивления обмотки статора и указанного сопротивления обмотки ротора друг близко к другу и обычно делают несколько 100-х долей. Полученные значения параметров обмотки статора и ротора находятся в рекомендуемом пределе.

1.7 Расчёт потерь

При работе асинхронного двигателя часть потребляемой мощности идёт на нагрев проводников, перемагничивание сердечника, вентиляцию, трение частей вращения о воздух, трение в подшипниках и др. Данную часть мощности считают потерями.

Потери в асинхронных машинах делятся на основные потери в стали и добавочные потери в стали, так же электрические потери, вентиляционные, механические и добавочные потери при нагрузке.

Основные потери обычно надо считать только в сердечнике статора, потому что если частота перемагничивания ротора, рассчитываемая как $f_2 = s \cdot f_1$ в близких к номинальному режим, маленькая, то потери в стали ротора и для больших индукций малы.

Масса стали статорных зубцов:

$$m_{z1} = h_{z1} \cdot b_{z1} \cdot Z_1 \cdot \ell_{cm1} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c = 0.015 \cdot 0.0069 \cdot 36 \cdot 0.117 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 3,4 \text{ кг}$$

где γ_c – удельная масса стали [1, с.206]; $\gamma_c = 7800 \text{ кг/м}^3$

Масса стали ярма статора по формуле

$$m_a = \pi \cdot (D_a - h_a) \cdot h_a \cdot \ell_{cm1} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c = \pi \cdot (0.225 - 0.023) \cdot 0.023 \cdot 0.117 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 12,9 \text{ кг}$$

Основные потери в стали по формуле

$$P_{ст.осн} = p_{1,0\%} \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta \cdot (\kappa_{Да} \cdot B_a^2 \cdot m_a + \kappa_{ДЗ} \cdot B_z^2 \cdot m_{z1}) = 2.6 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1.5} \cdot (1.6 \cdot 1,46^2 \cdot 12,9 + 1.8 \cdot 1.7^2 \cdot 3,4) = 159,5 \text{ Вт}$$

где $p_{1,0\%}$ – удельные потери в стали по табл.6-24 [1]; для стали 2013 $p_{1,0\%} = 2.6$

$\frac{\text{Вт}}{\text{кг}}$, β – показатель степени по табл.6-24 [1]; для стали 2013 $\beta = 1.5$

$\kappa_{да}$ и $\kappa_{дз}$ – коэффициенты, которые учитывают влияние потока по сечениям участков магнитопровода и факторов технологии на потери в стали при неравномерном распределении [1, с.206]; $\kappa_{да} = 1.6$ и $\kappa_{дз} = 1.8$.

Добавочные потери в стали, возникающие при холостом ходе, можно разделить на поверхностные потери (возникающие в поверхностном слое коронок статорных зубцов и роторных зубцов в зависимости от изменений индукции в воздушном зазоре) и пульсационные потери в стали зубцов (от пульсации индукции в зубцах).

Высота изменения индукции в воздушном зазоре над коронками зубцов ротора по формуле

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot \kappa_{\delta} \cdot B_{\delta} = 0.35 \cdot 1,182 \cdot 0.874 = 0,362 \text{ Тл.}$$

где β_{02} – коэффициент, который зависит от отношения ширины шлица статорных пазов к зазору для воздуха $\beta_{02}=f(b_{\text{шл1}}/\delta)$ по рис.6-41 [1]; $\beta_{02}=0.35$

Удельные потери по поверхности

$$p_{\text{нов2}} = 0.5 \cdot \kappa_{02} \cdot \left(\frac{Z_2 \cdot n}{10000} \right)^{1.5} \cdot (B_{02} \cdot t_1 \cdot 10^3)^2 = 0.5 \cdot 1.4 \cdot \left(\frac{26 \cdot 1500}{10000} \right)^{1.5} \cdot (0,362 \cdot 0.013 \cdot 10^3)^2 = 118,4 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

где κ_{02} – коэффициент, учитывающий влияние обработки поверхности ротора на удельные потери [1, с.207]; $\kappa_{02}=1.4$.

Все поверхностные роторные потери по поверхности

$$P_{\text{нов2}} = p_{\text{нов2}} \cdot (t_2 - b_{\text{ц2}}) \cdot Z_2 \cdot \ell_{\text{см2}} = 118,4(0.018 - 0,0035) \cdot 26 \cdot 0,117 = 5,2 \text{ Вт}$$

Масса зубцов стали ротора по формуле

$$m_{z2} = h_{z2} \cdot b_{z2} \cdot Z_2 \cdot \ell_{\text{см2}} \cdot \kappa_c \cdot \gamma_c = 0.0208 \cdot 0.0088 \cdot 26 \cdot 0.117 \cdot 0.97 \cdot 7800 = 4,1 \text{ кг}$$

Амплитуда пульсаций индукции в среднем сечении зубцов ротора по формуле

$$B_{\text{пуль'2}} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_2} \cdot B_{z2} = \frac{1,339 \cdot 0.0003}{2 \cdot 0.018} \cdot 1.831 = 0.021 \text{ Тл}$$

Пульсационные потери в зубцах ротора по формуле

$$P_{\text{пуль'2}} = 0.11 \cdot \left(\frac{Z_1 \cdot n}{1000} \cdot B_{\text{пуль'2}} \right)^2 \cdot m_{z2} = 0.11 \cdot \left(\frac{36 \cdot 1500}{1000} \cdot 0.021 \right)^2 \cdot 4,1 = 0,551 \text{ Вт}$$

Поверхностные потери и потери пульсации в статоре машины с короткозамкнутым ротором обычно очень маленькие как в углублениях такой ширины роторов, маленький вентиль ротора и пульсации индукции в воздушном зазоре по головам зубцов статора незначителен.

При закрытых пазах ротора расчёт этих потерь в статоре двигателя не производится.

Сумма добавочных потерь по формуле

$$P_{\text{ст.доб}} = P_{\text{нов2}} + P_{\text{пуль2}} = 5,2 + 0,551 = 5,7 \text{ Вт}$$

Полные потери в стали по формуле

$$P_{ст} = P_{ст.осн} + P_{ст.доб} = 159,5 + 5,7 = 165,2 \text{ Вт}$$

Потери механические

$$P_{мех} = K_T \cdot \left(\frac{n}{10}\right)^2 \cdot D_a^4 = 1,5 \cdot \left(\frac{1500}{10}\right)^2 \cdot 0,225^4 = 86,5 \text{ Вт}$$

где K_T – коэффициент [1, с.208]; при $2p=4$ $K_T = 1,5$

Добавочные потери при номинальном режиме [1, с.209].

Добавочные потери возникают за счёт действия потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривых распределения МДС обмоток статора и ротора. В короткозамкнутых роторах, кроме того, возникают потери от поперечных токов, то есть токов между стержнями, замыкающихся через листы сердечника ротора. ГОСТ устанавливает средние расчётные добавочные потери при номинальной нагрузке, равные 0,5 % номинальной мощности.

$$P_{доб} = 0,005 \cdot \frac{P_2}{\eta} = 0,005 \cdot \frac{7500}{0,87} = 46 \text{ Вт}$$

Электрические потери при холостом ходе в обмотке статора по формуле

$$P_{элх,х} = m \cdot I_\mu^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 4,0^2 \cdot 0,872 = 42,6 \text{ Вт}$$

Активная составляющая тока холостого хода по формуле

$$I_{x,x,a} = \frac{P_{ст} + P_{мех} + P_{элх,х}}{m \cdot U_{1H}} = \frac{165,2 + 86,5 + 42,6}{3 \cdot 220} = 0,446 \text{ А}$$

Ток холостого хода двигателя по формуле

$$I_{x,x} = \sqrt{I_{x,x,a}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{0,446^2 + 4,0^2} = 4,1 \text{ А}$$

Коэффициент мощности при холостом ходе по формуле

$$\cos \varphi_{x,x} = \frac{I_{x,x,a}}{I_{x,x}} = \frac{0,446}{4,1} = 0,11$$

1.8 Расчёт рабочих характеристик

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости P_1 , I_1 , $\cos\varphi$, η , $s = f(P_2)$. Методы расчёта характеристик базируются на системе уравнений токов и напряжений асинхронной машины, которой соответствует Г-образная схема замещения (рис. 1.4). Активные и индуктивные сопротивления схемы замещения являются параметрами машины.

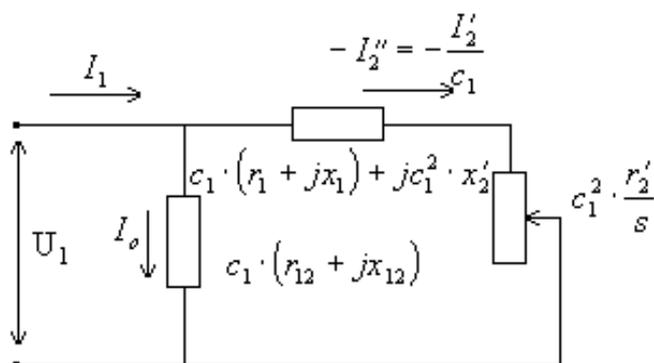


Рисунок 1.4 – Преобразованная Г-образная схема замещения приведённой асинхронной машины.

Коэффициент c_1 представляет собой взятое с обратным знаком отношение вектора напряжения фазы U_1 к вектору ЭДС E_1 , при синхронном вращении машины с учётом сдвига фаз этих векторов.

Расчётное сопротивление r_{12} по формуле

$$r_{12} = \frac{P_{ст.осн}}{m \cdot I_{\mu}^2} = \frac{159,5}{3 \cdot 4,0^2} = 3,267 \text{ Ом}$$

Сопротивление взаимной индукции обмоток статора и ротора по формуле 6.180 [1]; $x_{12} = \frac{U_{1H}}{I_{\mu}} - x_1 = \frac{220}{4,0} - 2,03 = 52,51 \text{ Ом}$

Коэффициент c_1 по формуле 6.218 [1];

$$c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_{12}} = 1 + \frac{2,03}{52,51} = 1,039$$

Была использована приближённая формула:

$$\gamma = \arctg \frac{r_1 \cdot x_{12} - r_{12} \cdot x_1}{r_{12} \cdot (r_1 + r_{12}) + x_{12} \cdot (x_1 + x_{12})} = \arctg \frac{0,872 \cdot 52,51 - 3,267 \cdot 2,03}{3,267 \cdot (0,872 + 3,267) + 52,51 \cdot (2,03 + 52,51)} = 0,014$$

Расчёт рабочих характеристик можно проводить с помощью круговой диаграммы или аналитическим методом. Расчёт по круговой диаграмме более нагляден, но менее точен, так как требует графических построений, снижающих точность расчёта. Аналитический метод более универсален, позволяет учитывать изменение отдельных параметров при различных скольжениях и может быть легко переведён на язык программ при использовании ЭВМ в расчётах.

Для расчёта рабочих характеристик выбираем аналитический метод. Расчёт характеристик проводим, задавая значениями скольжений в диапазоне $s=(0.011 \div 0,065)s_H$. Номинальное скольжение предварительно принимаем равным $s_H=r_2^*=0.037$. Для построения характеристик можно только вычислить значения требуемых величин для нескольких различных скольжений (обычно пять-шесть), которые выбираются в найденном диапазоне через равные интервалы.

Активная составляющая тока синхронного холостого хода по формуле

$$I_{oa} = \frac{P_{ст.осн} + 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1}{3 \cdot U_1} = \frac{159,5 + 3 \cdot 4,0^2 \cdot 0,872}{3 \cdot 220} = 0,306 \text{ A}$$

Постоянные коэффициенты по формуле

$$a' = c_1^2 = 1.039^2 = 1.079; \quad a = c_1 \cdot r_1 = 1.039 \cdot 0,872 = 0,906$$

$$b' = 0; \quad b = c_1 \cdot (x_1 + c_1 \cdot x'_2) = 1.039 \cdot (2,03 + 1.039 \cdot 2,44) = 4,74$$

Результаты расчёта сведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты расчёта

N п/п	Расчётная формула	Еде- ниц а.	Скольжение						
			0,001	0,011	0,022	0,033	0,037	0,05	0,065
1	$b' \cdot r_2' / s$	Ом	0	0	0	0	0	0	0
2	$R = a + a' \cdot r_2' / s$	Ом	547,8	50,63	25,77	17,48	15,69	11,85	9,32
3	$X = b + b' \cdot r_2' / s$	Ом	4,744	4,744	4,744	4,744	4,744	4,744	4,744
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом	547,85	50,85	26,2	18,11	16,39	12,76	10,46
5	$I_2'' = U_{н1} / Z$	А	0,402	4,327	8,397	12,15	13,42	17,24	21,04
6	$\cos \varphi_2' = R / Z$	–	1	0,996	0,983	0,965	0,957	0,928	0,891
7	$\sin \varphi_2' = X / Z$	–	0,009	0,093	0,181	0,262	0,289	0,327	0,454
8	$I_{1a} = I_{oa} + I_2'' \cdot \cos \varphi_2'$	А	0,708	4,614	8,564	12,03	13,15	16,31	19,05
9	$I_{1p} = I_{op} + I_2'' \cdot \sin \varphi_2'$	А	4,037	4,437	5,554	7,215	7,919	10,45	13,58
10	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А	4,099	6,401	10,21	14,03	15,35	19,37	23,40
11	$I_2' = c_1 \cdot I_2''$	А	0,417	4,494	8,722	12,62	13,94	17,91	21,85
12	$P_1 = 3 \cdot U_{н1} \cdot I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт	0,467	3,045	5,652	7,939	8,682	10,76	12,58
13	$P_{\sigma 1} = 3 \cdot I_1'^2 \cdot r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт	0,044	0,107	0,273	0,515	0,617	0,982	1,432
14	$P_{\sigma 2} = 3 \cdot I_2'^2 \cdot r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт	0,002	0,031	0,116	0,242	0,296	0,488	0,726
15	$m_{\text{ЛБ}''\ddagger} = m_{\text{ЛБ}''\ddagger} \cdot (I_1 / I_1')^2$	кВт	0,003	0,008	0,018	0,034	0,041	0,066	0,096
16	$\sum m = m_{\square} + m_{\text{ЛБ}''\ddagger} + m_{\sigma 1} + m_{\sigma 2} + m_{\text{ЛБ}''\ddagger}$	кВт	0,298	0,396	0,658	1,043	1,205	1,786	2,505
17	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт	0,169	2,649	4,995	6,896	7,477	8,979	10,07

18	$\eta = 1 - \sum P/P_1$	-	0,362	0,87	0,884	0,869	0,861	0,834	0,801
19	$\cos \varphi = I_{1a}/I_1$	-	0,173	0,721	0,839	0,858	0,857	0,842	0,814

По результатам расчётов строятся рабочие характеристики, которые представлены на рис. 1. 5.

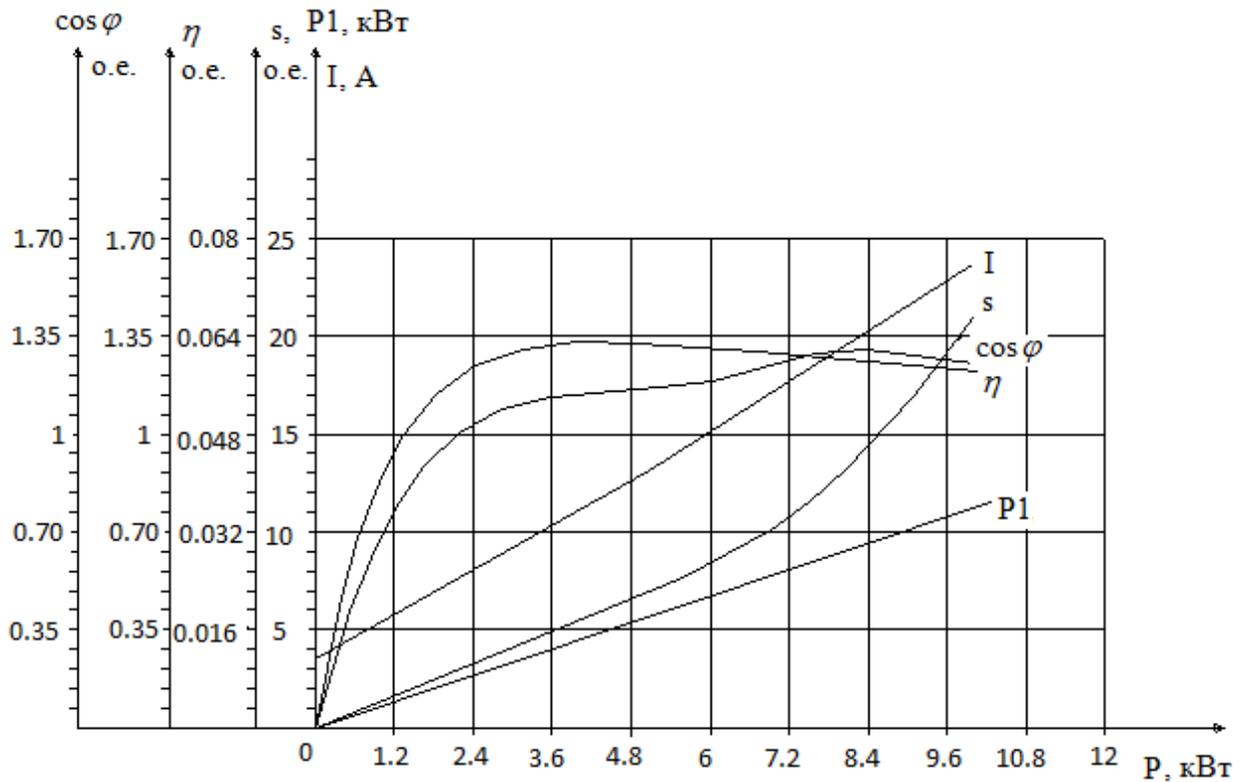


Рисунок 1.5 – Рабочие характеристики

1.9 Расчет пусковых характеристик

Расчёт токов с учётом влияния изменения параметров под влиянием эффекта вытеснения тока (без учёта влияния насыщения от полей рассеяния).

Расчёт для S=1.

Активное сопротивление обмотки ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока ($v_{расч}=115^{\circ}C$; $\rho_{75}=10^{-6}/20.5 \text{ Ом}\cdot\text{м}$)

$$h_c = h_{\pi} - h_{ш} = 0.0198 \text{ м};$$

$$\text{по формуле } \xi = 63.61 \cdot h_c \cdot \sqrt{s} = 63,61 \cdot 0.0198 = 1,256;$$

по рис. 6.46 [1] для $\xi = 1,301$ $\varphi = 0,447$;

глубина проникновения тока

$$h_r = \frac{h_c}{1 + \varphi} = \frac{0.0198}{1 + 0,447} = 0.0137 \text{ м};$$

площадь сечения q_r по формуле

$$q_r = \frac{\pi b_1^2}{8} + \frac{b_1 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{b_1}{2} \right) = \frac{\pi 0.008^2}{8} + \frac{0.008 + 0.0047}{2} \left(0.0137 - \frac{0.008}{2} \right) = 8,64 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

где коэффициент k_r рассчитывается по формуле

$$k_r = q_c / q_r = 120,8 / 86,4 = 1,398 ;$$

коэффициент общего увеличения сопротивления фазы ротора под влиянием эффекта вытеснения тока по формуле

$$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} (k_r - 1) = 1 + \frac{47,2 \cdot 10^{-6}}{68,4 \cdot 10^{-6}} (1,398 - 1) = 1,275 ;$$

приведённое активное сопротивление ротора с учётом влияния эффекта вытеснения тока [1, с.249]:

$$r'_{2\xi} = K_R r'_2 = 1,275 \cdot 0,507 = 0.646 \text{ Ом.}$$

Коэффициент изменения индуктивного сопротивления фазы обмотки ротора от действия эффекта вытеснения тока по формуле

$$K_x = \frac{\lambda_{n2\xi} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{ck2}}{\lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{o2} + \lambda_{ck2}} = \frac{1,199 + 1,598 + 4,247}{1,282 + 1,598 + 4,247} = 0,988 ;$$

где $\lambda_{n2\xi}$ – коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния с учетом эффекта вытеснения тока, по табл.6.23 [1]:

$$\begin{aligned} \lambda_{n2\xi} &= \left(\frac{h_1}{3b_1} \left(1 - \frac{\pi b_1^2}{8q_c} \right)^2 + 0.66 - \frac{b_{u2}}{2b_1} \right) k_o + 0.3 + 1.12 \frac{h_{u2} \cdot 10^6}{I_2} = \\ &= \left(\frac{0.0137}{3 \cdot 0.008} \left(1 - \frac{\pi \cdot 0.008^2}{8 \cdot 120,8 \cdot 10^{-6}} \right)^2 + 0.66 - \frac{1,0}{2 \cdot 0.008} \right) 0.94 + \frac{0.0003 \cdot 10^6}{420,7} = 1,199; \end{aligned}$$

индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учётом действия эффекта вытеснения тока по формуле 6. 250 [1];

$$x'_{2\xi} = x'_2 K_x = 2,44 \cdot 0,988 = 2,411 \text{ Ом.}$$

Пусковые параметры по формуле

$$x_{12n} = k_\mu x_{12} = 1,399 \cdot 52,51 = 73,5 \text{ Ом,}$$

Подробный расчёт для $S=1$.

Индуктивные сопротивления обмоток. Принимаем [1, с.219]: $k_H=1.4$ средняя МДС обмотки, отнесённая к одному пазу обмотки статора по формуле

$$F_{n.sp} = 0,7 \frac{I_1 k_{нас} u_{n1}}{a} \left(k'_\beta + k_y \cdot k_{об1} \frac{Z_1}{Z_2} \right) = 0,7 \frac{46,8 \cdot 1,4 \cdot 22}{1} \left(1 + 1 \cdot 0,96 \frac{36}{26} \right) = 2352 \text{ А,}$$

коэффициент C_N по формуле 6.254 [1]

$$C_N = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{\delta}{t_{z1} + t_{z2}}} = 0,64 + 2,5 \sqrt{\frac{0,0003}{0,013 + 0,018}} = 0,964 ,$$

фиктивная индукция потока рассеяния в воздушном зазоре по формуле

$$B_{\Phi\delta} = \frac{F_{n.sp} \cdot 10^{-6}}{1,6\delta \cdot C_N} = \frac{2352 \cdot 10^{-6}}{1,6 \cdot 0,0003 \cdot 0,964} = 5,084 \text{ Тл.}$$

По рис. 6.50 [1] для $B_{\Phi\delta} = 5,084 \text{ Тл}$ находим $k_\delta=0.45$.

Коэффициент магнитной проводимости пазового рассеяния обмотки статора с учётом влияния насыщения по формуле

$$c_{\rho 1} = (t_{z1} - b_{ш1})(1 - k_\delta) = (0,013 - 0,003)(1 - 0,45) = 0,0055 \text{ м.}$$

Уменьшение коэффициента проводимости рассеяния паза статора по формуле

$$\Delta\lambda_{n1нас} = \frac{h_{ш1} + h_k}{b_{ш1}} \frac{c_{\rho 1}}{c_{\rho 1} + 1,5b_{ш1}} = \frac{0,0005 + 0,00035}{0,003} \frac{0,0055}{0,0055 + 1,5 \cdot 0,003} = 0,0016.$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния паза статора с учетом насыщения по формуле 6.261 [1]

$$\lambda_{n1нас} = \lambda_{n1} - \Delta\lambda_{n1нас} = 1,216 - 0,0016 = 1,214 .$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора с учетом насыщения по формуле 6.263 [1]

$$\lambda_{\sigma 1 \text{нас}} = \lambda_{\sigma 1} k_{\delta} = 5,264 \cdot 0,45 = 2,369.$$

Индуктивное сопротивление обмотки статора с учетом насыщения по формуле

$$x_{1 \text{нас}} = x_1 \frac{\Sigma \lambda_{1 \text{нас}}}{\Sigma \lambda_1} = 2,03 \frac{1,214 + 2,369 + 1,1}{1,216 + 5,264 + 1,1} = 1,256 \text{ Ом.}$$

Коэффициент магнитной проводимости рассеяния паза ротора с учетом насыщения по формуле

$$\lambda_{n2\xi \text{нас}} = \lambda_{n2\xi} = 0,451.$$

Коэффициент магнитной проводимости дифференциального рассеяния статора с учетом насыщения по формуле

$$\lambda_{\sigma 2 \text{нас}} = \lambda_{\sigma 2} k_{\delta} = 4,247 \cdot 0,45 = 1,911.$$

Приведенное индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора с учетом насыщения и вытеснения тока по формуле

$$x'_{2\xi \text{нас}} = x'_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xi \text{нас}}}{\Sigma \lambda_2} = 1,457 \text{ Ом,}$$

коэффициент $c_{1п.нас}$ по формуле

$$c_{1п.нас} = 1 + \frac{x_{1 \text{нас}}}{x_{12п}} = 1 + \frac{1,256}{73,5} = 1,017.$$

Расчет токов и моментов: токи по формуле

$$I'_{2 \text{нас}} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} = \frac{220}{\sqrt{1,53^2 + 1,785^2}} = 46,839 \text{ А,}$$

Кратность пускового тока с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1, с. 251]:

$$I_{П*} = \frac{I_{1 \text{нас}}}{I_{\text{ном}}} = \frac{94,27}{16,2} = 5,819$$

Кратность пускового момента с учётом влияния эффекта вытеснения тока и насыщения [1, с. 251]:

$$M'_n = \left(\frac{I'_{2n.нас}}{I'_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{S_{ном}}{S} = \left(\frac{93,588}{13,9} \right)^2 1,275 \frac{0,037}{1} = 2,157$$

Результаты расчёта сведены в таблице 1.2. По результатам расчётов строятся пусковые характеристики $M_*, I_* = f(s)$, которые представлены на рис. 1.6.

Таблица 1.2 – Расчёт пусковых характеристик с учётом эффекта вытеснения тока и насыщения от полей рассеяния

№	Расчётная формула	Ед	Скольжение S					
			1	0.8	0.5	0.2	0,1	0.001
1	$\xi = 65.15 h_c \sqrt{s}$	–	1,256	1,124	0,888	0,562	0,397	0,04
2	$\varphi(\xi)$	–	0,447	0,4	0,316	0,2	0,141	0,014
3	$k_r = q_c / q_r$	–	1,398	1,352	1,271	1,159	1,102	0,979
4	$K_R = 1 + \frac{r'_c}{r_2} (k_r - 1)$	–	1,275	1,243	1,187	1,11	1,07	0,985
5	$r'_{2\xi} = K_R r'_2$	Ом	0,646	0,63	0,602	0,562	0,543	0,5
6	$k_d = \varphi'(\xi)$	–	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	1
7	$K_x = \Sigma \lambda_{2\xi} / \Sigma \lambda_2$	–	0,988	0,99	0,991	0,992	0,994	0,996
8	$x'_{2\xi} = x'_2 K_x$	Ом	2,411	2,415	2,418	2,421	2,424	2,431
9	$x'_{2\xi.нас} = x'_2 \frac{\Sigma \lambda_{2\xi.нас}}{\Sigma \lambda_2}$	Ом	1,457	1,475	1,493	1,616	1,769	2,431
10	$x_{1нас} = x_1 \frac{\Sigma \lambda_{1нас}}{\Sigma \lambda_1}$	–	1,256	1,27	1,285	1,397	1,539	2,033
11	$c_{1n.нас} = 1 + \frac{x_{1нас}}{x_{12n}}$	–	1,017	1,017	1,017	1,019	1,021	1,028
12	$R_{n.нас} = r_1 + c_{1n.нас} \frac{r'_{2\xi}}{s}$	Ом	1,53	1,674	2,097	3,738	6,412	514,2

13	$X_{п.нас} = x_1 + c_{1п.нас} \cdot x_{2\xi}'$	Ом	1,785	1,841	1,959	2,221	2,455	3,546
14	$I_{2нас}' = \frac{U_{1ном}}{\sqrt{R_{п.нас}^2 + X_{п.нас}^2}}$	А	46,839	46,338	44,792	38,057	28,511	0,44
15	$I_{1нас}' = I_{2нас}' \frac{\sqrt{R_{п.нас}^2 + (X_{п.нас} - X_{12п})^2}}{c_{1п.нас} \cdot X_{12п}}$	А	94,27	89,119	77,438	51,217	32,549	2,947
16	$I_{п*}' = \frac{I_{1п.нас}}{I_{1ном}}$	–	5,819	5,501	4,78	3,161	2,009	0,182
17	$M_{п}' = \left(\frac{I_{2п.нас}}{I_{2ном}} \right)^2 K_R \frac{S_{ном}}{S}$	–	2,157	2,347	2,7	2,744	2,123	0,035

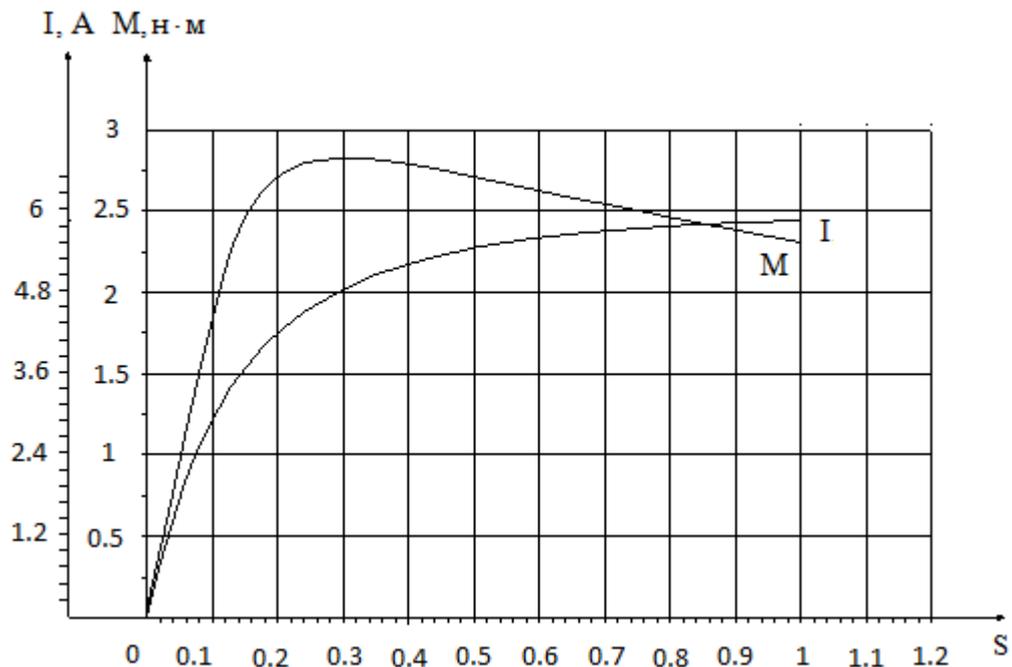


Рисунок 1.6 – Пусковые характеристики

1.10 Вывод по главе 1

В представленной главе разработан трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Поскольку конструкция базовой модели асинхронных механизмов серии 4А, которые предназначены для самого широкого приложения в различных ответвлениях народного

хозяйства, выбрана. Сначала при выполнении расчета двигателя были получены значения электромагнитных нагрузок A и B_{δ} , которые входят в указанные пределы, полученные по результатам исследования работающих двигателей серии 4А. От электромагнитных нагрузок зависят и размеры машины, и характеристики двигателя. Число пазов статора стандартно и равно $Z_1 = 36$, т.о. обмотка имеет целое число пазов на полюс и фазу ($q=3$).

Плотность тока в обмотке статора значительна, что соответствует машинам мощности небольшой и средней. Статорная обмотка выполняется из стандартного провод диаметром $d_{из}=1.33\text{мм}$, эмалированного, что дает возможность укладывать обмотку с помощью механизмов. Коэффициент пазного заполнения соответствует укладке с использованием механизмов. При вычислении зоны зубцов статора было решено использовать такую конфигурацию пазов, которая имеет зубцы с постоянным поперечным сечением по всей высоте, это ведет к отсутствию мест с разной индукцией.

Воздушный зазор был выбран небольшим, это соответствует уменьшению силы намагничивания магнитной цепи и тока намагничивания. Суммарные потери уменьшаются, что приводит к повышению $\cos \varphi$ и коэффициента полезного действия в рабочих характеристиках. Пазовое число ротора выбрано исходя из рекомендаций о влиянии отношения числа зубцов статора и ротора на кривую момента, шумы и вибрации. Роторные пазы будут без скоса. Когда вычисляющие характеристики получили указанные ценности номинального тока обмотки статора и ротора, потребляемой двигателем, который это меньше, чем работы, принятые в начале ранее.

При получении пусковых характеристик кратность пускового тока лежит в допустимых пределах, которые установлены стандартом (ГОСТ 19523-74), пусковой момент соответствует техническому заданию, его кратность больше значения, выданного в задании. Это было следствие таких факторов как довольно высокое сопротивление фазы обмотки ротора, высокой и тонкой формы углублений ротора, в котором имеет место эффект вытеснения тока, что показывает действия пазового рассеяния. Таким

образом возможно установить стартовый момент, изменяя плотность тока в обмотке ротора или индукции в зубах ротора.

2 Тепловой расчёт

Если происходит проектирование двигателя впервые, то достаточно использовать метод, который основан на упрощённом понимании характера связей тепла между составными частями двигателя. Этот метод считается вполне достоверным на первых шагах. В данном методе берутся средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности машины и изоляционной теплопроводности, что характерно для конкретной конструкции машины и производственной технологии двигателей указанного типа.

Расчет теплоотдачи можно выполнить для статора. Когда выполняется вычисление потерь, полученных для номинального способа, используются, потери немного в увеличении обмотки статора по сравнению с полученными при расчете. При этом полагают, что обмотка нагревается до наибольшего значения температуры в соответствии с принятым классом изоляции.

Потери электричества в статорной обмотке вычисляются так

$$P'_{э,н1} = \kappa_p \cdot P_{э1} \cdot \frac{2 \cdot \ell_1}{\ell_{cp1}} = 1.07 \cdot 617 \cdot \frac{2 \cdot 0.117}{0.635} = 243 \text{ Вт}$$

где κ_p – коэффициент повышения потерь [1, с.235]; $\kappa_p=1.07$

Электрические потери в обмотке статора в лобовой части по формуле

$$P'_{э,н1} = \kappa_p \cdot P_{э1} \cdot \frac{2 \cdot \ell_{н1}}{\ell_{cp1}} = 1.07 \cdot 617 \cdot \frac{2 \cdot 0.201}{0.635} = 417,2 \text{ Вт}$$

Температурное увеличение для внутренней поверхности статорного статора над воздушной температурой внутри двигателя рассчитывается следующим образом

$$\Delta\theta_{нов1} = K \cdot \frac{P'_{э,н1} + P_{ст.очн}}{\pi \cdot D \cdot \ell_1 \cdot \alpha_1} = 0.2 \cdot \frac{243 + 159,5}{\pi \cdot 0.149 \cdot 0.117 \cdot 110} = 13,4^\circ\text{C}$$

где K – коэффициент, который учитывает тот факт, что часть потерь в статорном сердечнике и в части пазов обмотки уходит через станину в окружающую среду, взято из табл.6-30 [1]; при $2p=4$, $K=0.2\alpha_1$ – значение

коэффициента теплоотдачи с поверхности статорного сердечника статора по

рис. 6-59а [1]; $\alpha_1=110 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}$.

Расчётный периметр поперечного сечения паза статора по формуле

$$P_{n1} = 2 \cdot h_n + b_1 + b_2 = 2 \cdot 0.0137 + 0.008 + 0.0047 = 0.04 \text{ м}.$$

Изменение температуры в изоляции пазовой части статорной обмотки

[1]

$$\Delta\theta_{из,н1} = \frac{P'_{э,л1}}{Z_1 \cdot P_{н1} \cdot \ell_1} \cdot \left(\frac{b_{из1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \cdot \lambda'_{эКВ}} \right) = \frac{243}{36 \cdot 0.04 \cdot 0.117} \cdot \left(\frac{0.4 \cdot 10^{-3}}{0.16} + \frac{0.008 + 0.0047}{16 \cdot 1.4} \right) = 4,0^\circ \text{C}$$

где $\lambda_{эКВ}$ – средняя эквивалентная теплопроводность пазовой изоляции [1, с.237]; $\lambda_{эКВ}=0.16 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$.

$\lambda'_{эКВ}$ – значение коэффициента теплопроводности в среднем для внутренней изоляции катушек обмотки насыпной из проводников с эмалированным покрытием с учётом прилегания проводников друг к другу в неплотном виде по рис.6-62[1]; $\lambda'_{эКВ}=1,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$.

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей

$$\Delta\theta_{из,л1} = \frac{P'_{э,л1}}{2 \cdot Z_1 \cdot P_{л1} \cdot \ell_{л1}} \cdot \left(\frac{b_{из,л1}}{\lambda_{эКВ}} + \frac{h_{н1}}{12 \cdot \lambda'_{эКВ}} \right) = \frac{417,2}{2 \cdot 36 \cdot 0.004 \cdot 0.117} \cdot \left(\frac{0,04 \cdot 10^{-3}}{0,16} + \frac{0,016}{12 \cdot 1,4} \right) = 1,8^\circ \text{C}$$

где $P_{л1}$ – периметр условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки [1, с. 237]; $P_{л1} \approx P_{н1}=0.004 \text{ м}$, $b_{из,л1}$ – односторонняя толщина изоляции лобовой части катушки $b_{из,л1}=0,04$.

Избыток температуры внешней поверхности изоляции передних частей обмотки по температуре воздуха в двигателе

$$\Delta\theta_{нов,л1} = \frac{K \cdot P'_{э,л1}}{2 \cdot \pi \cdot D \cdot \ell_{выл1} \cdot \alpha_1} = \frac{0.2 \cdot 417,2}{2 \cdot \pi \cdot 0.149 \cdot 0.068 \cdot 110} = 11,9^\circ \text{C}$$

Повышение воздушной температуры внутри двигателя над температурой окружающей среды в среднем

$$\Delta\theta'_1 = \frac{(\Delta\theta_{нов1} + \Delta\theta_{уз,н1}) \cdot 2 \cdot \ell_1}{\ell_{сп1}} + \frac{(\Delta\theta_{уз,т1} + \Delta\theta_{нов,т1}) \cdot 2 \cdot \ell_1}{\ell_{сп1}} = \frac{(13,4 + 4,0) \cdot 2 \cdot 0,117}{0,635} + \frac{(1,8 + 11,9) \cdot 2 \cdot 0,117}{0,635} = 15,0^\circ C$$

Поверхность для отдачи тепла в эквиваленте

$$S_{кор} = (\pi \cdot D_a + 8 \cdot \Pi_p) \cdot (\ell_1 + 2 \cdot \ell_{выт1}) = (\pi \cdot 0,225 + 8 \cdot 0,24) \cdot (0,117 + 2 \cdot 0,068) = 0,666 \text{ м}^2$$

где Π_p – сумма сторон сечения рёбер станины в поперечном разрезе, взятый условно по рис.6-63[1]: $\Pi_p = 0,24 \text{ м}$.

Потери в сумме, передаваемых в воздух внутри машины

$$\sum P'_B = \sum P' - (1 - K) \cdot (P'_{э,н1} + P_{см.очн}) - 0,9 \cdot P_{мех} = 1269 - (1 - 0,2) \cdot (243 + 159,5) - 0,9 \cdot 86,5 = 869,1 \text{ Вт}$$

где по формуле $\sum P' = \sum P + (\kappa_p - 1) \cdot (P_{э1} + P_{э2}) = 1205 + (1,07 - 1) \cdot (617 + 296) = 1269 \text{ Вт}$

Повышение воздушной температуры внутри двигателя над температурой окружающей среды

$$\Delta\theta_B = \frac{\sum P'_B}{S_{кор} \cdot \alpha_B} = \frac{869,1}{0,666 \cdot 26} = 50,2^\circ C$$

где α_B – коэффициент воздушного нагрева [1, с.235 рис.6-59a]; $\alpha_B = 26 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{С}$

Увеличение температуры статорной обмотки над температурой окружающей среды в среднем рассчитывается как

$$\Delta\theta_1 = \Delta\theta'_1 + \Delta\theta_B = 15,0 + 50,2 = 65,2^\circ$$

Вычислительное значение увеличения температуры входит в диапазон температуры для указанного изоляционного класса (класса В).

2.1 Вывод по главе 2

Расчет теплоотдачи показал, что проектируемый двигатель имеет в наличие небольшой температурный запас по температуре нагрева статорной

обмотки, соответствующее классу изоляции В, а вентилятор обеспечивает расход воздуха почти с двукратным запасом.

3 Вентиляционный расчёт

Вентиляционный расчёт асинхронного двигателя, так же как и тепловой на первоначальном этапе проектирования, может быть выполнен приближённым методом. Метод заключается в сопоставлении расхода воздуха, необходимого для охлаждения двигателя и расхода, который может быть получен при данной конструкции и размерах двигателя.

Коэффициент, учитывающий изменение условий охлаждения по длине поверхности корпуса, обдуваемого наружным вентилятором по

$$\text{формуле } \kappa_m = m \cdot \sqrt{\frac{n}{100} \cdot D_a} = 1,8 \cdot \sqrt{\frac{1500}{100} \cdot 0,225} = 3,3$$

где κ_m – коэффициент [1, с.240]; для двигателе с $2p = 4$ при $h=0.132$ м, $m=1,8$

Требуемый для охлаждения расход воздуха по формуле

$$Q_B = \frac{\kappa_m \cdot \sum P'_B}{1100 \cdot \Delta\theta_B} = \frac{3,3 \cdot 869,1}{1100 \cdot 50,2} = 0,052 \frac{M^3}{c}$$

Расход воздуха, обеспечиваемый наружным вентилятором

$$Q'_B = 0,6 \cdot D_a^3 \cdot \frac{n}{100} = 0,6 \cdot 0,225^3 \cdot \frac{1500}{100} = 0,103 \frac{M^3}{c}$$

$Q'_B > Q_B$ необходимое условие для охлаждения машин выполнено.

3.1 Вывод по главе 3

Нагрев частей двигателя находится в допустимых пределах.

Вентилятор обеспечивает необходимый расход воздуха.

4 Механический расчёт

Асинхронный двигатель выполнен с горизонтальным расположением вала. В этом случае вал несёт на себе всю массу вращающихся частей, через него передаётся вращающий момент машины. При сочленении машины с исполнительным механизмом на вал действуют дополнительные изгибающие силы. Кроме того, на вал могут действовать силы одностороннего магнитного притяжения, вызванные магнитной несимметрией, усилия, появляющиеся из-за наличия небаланса вращающихся частей, а также усилия, возникающие при появлении крутильных колебаний. Правильно сконструированный вал должен быть достаточно прочным, чтобы выдерживать все действующие на него нагрузки без появления остаточных деформаций. Вал должен также иметь достаточную жёсткость, чтобы при работе машины ротор не задевал о статор. Критическая частота вращения вала должна быть значительно больше рабочих частот вращения машины. Окончательные размеры вала устанавливаются после его расчётов на жёсткость и прочность. На рис. 4.1 представлен эскиз вала ротора асинхронной машины.

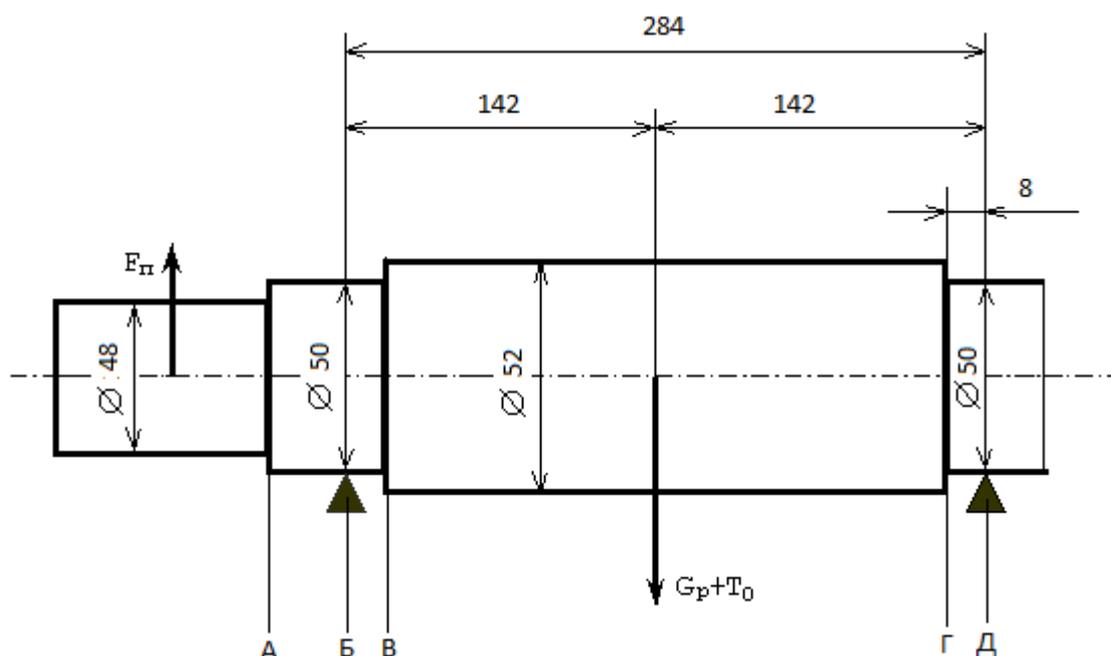


Рисунок 4.1 – Эскиз вала ротора асинхронной машины

Принимая, что ротор асинхронной машины представляет собой сплошной цилиндр с плотностью 8300 кг/м^3 , его массу можно определить как

$$m_p = 6500 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 6500 \cdot 0.128^2 \cdot 0.14 = 14,8 \text{ кг}$$

Сила тяжести ротора

$$G_p = 9.81 \cdot m_p = 9.81 \cdot 14,8 = 145,1 \text{ Н}$$

Определим поперечную силу, приложенную к выступающему концу вала

$$F_n = k_n \cdot \frac{M_n \cdot 2}{D_1} = 0.3 \cdot \frac{39,4 \cdot 2}{0,2} = 118,3 \text{ Н},$$

где M_n – номинальный вращающий момент;

$$M_n = 9550 \cdot \frac{P_2}{n_n} = 9550 \cdot \frac{7500}{1452} = 39,4 \text{ Нм},$$

$$n_n \text{ – частота вращения вала ротора } n_n = n \cdot (1 - S) = 1500 \cdot (1 - 0.032) = 1452$$

об/мин, k_n – коэффициент, при подаче упругой муфтой $k_n=0,3$, D_1 – диаметр по центрам пальцев муфты $D_1=0,2$ м.

Прогиб вала по середине сердечника под действием силы тяжести

$$f_q = \frac{G_p}{3 \cdot E \cdot l^2} \cdot (S_A a^2 + S_B b^2) =$$

$$= \frac{113,5}{3 \cdot 2.06 \cdot 10^{11} \cdot 0,228} \cdot (7,605 \cdot 10^3 \cdot 0,142^2 + 2,649 \cdot 10^6 \cdot 0,142^2) = 1,893 \cdot 10^{-4}$$

где E – модуль упругости $E=2,06 \cdot 10^{11}$ Па,

$$S_A = \sum \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{J_i} = 1,341 \cdot 10^7 \quad S_B = \sum \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{J_i} = 7,605 \cdot 10^3$$

Вал разбивают на три участка a , b , c – это расстояния от места приложения силы до ближайшей опоры $a=142 \cdot 10^{-3}$ м, $b=142 \cdot 10^{-3}$ м, $c=55 \cdot 10^{-3}$ м.

Прогиб вала по середине магнитопровода ротора от поперечной силы муфты:

$$\begin{aligned}
 f_n &= \frac{F_n \cdot c}{3 \cdot E \cdot l^2} \left(\frac{3}{2} \cdot l \cdot S_0 - S_B \right) \cdot a + S_A \cdot b = \\
 &= \frac{78,7 \cdot 0,055}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,228^2} \left(\frac{3}{2} \cdot 7,721 \cdot 228 \cdot 10^4 - 7,605 \cdot 10^3 \right) \cdot 142 \cdot 10^{-3} + 1,341 \cdot 10^7 \cdot 142 \cdot 10^{-3} = \\
 &= 5,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}
 \end{aligned}$$

где $S_0 = \sum \frac{y_i^2 - y_{i-1}^2}{J_i} = 7,721 \cdot 10^4 \frac{1}{\text{м}}$

Первоначальное смещение ротора:

$$l_0 = 0,1 \cdot \delta + f_q + f_n = 0,1 \cdot 0,00035 + 1,893 \cdot 10^{-4} + 5,317 \cdot 10^{-4} = 0,021 \text{ м},$$

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения

$$T_0 = 2,94 \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot \frac{l_0}{\delta} = 2,94 \cdot 0,127 \cdot 0,140 \cdot \frac{0,021}{0,00035} = 349 \text{ Н},$$

Прогиб вала от силы T_0

$$f_m = \frac{f_q \cdot T_0}{G_p} = \frac{1,893 \cdot 10^{-4} \cdot 349}{113,5} = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Установившийся прогиб вала от одностороннего момента притяжения:

$$f_m = \frac{f_m}{1-m} = \frac{5,8 \cdot 10^{-4}}{1-0,028} = 5,9 \cdot 10^{-4} \text{ м},$$

где $m = f_m / l_0 = 0,028$

Суммарный прогиб по середине магнитопровода ротора:

$$F = f_m + f_q + f_n = 5,9 \cdot 10^{-5} + 1,8 \cdot 10^{-5} + 5,3 \cdot 10^{-5} = 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Критическая частота вращения:

$$n_k = 30 \cdot \sqrt{\frac{1-m}{f_q}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{1-0,028}{1,8 \cdot 10^{-5}}} = 2,15 \cdot 10^4 \text{ об/мин}$$

Коэффициент нагрузки $k=2$

Напряжение на свободном конце вала в сечении А:

Изгибающий момент в расчетном сечении

$$M_{uA} = k \cdot F_n \cdot Z = 2 \cdot 78,7 \cdot 0,0020 = 8,6 \text{ Нм}$$

где $Z=0,002$ м – расстояние указано на эскизе вала

$$\text{Момент сопротивления при изгибе } W_A = 0.1 \cdot d^3 = 0.1 \cdot 0.035^3 = 1,96 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

где $d=0,035$ м – диаметр вала в сечении А

Напряжение изгиба

$$\begin{aligned}\sigma_{npA} &= \frac{1}{W_A} \cdot \sqrt{MuA^2 + (\kappa \cdot \alpha \cdot M_n)^2} = \\ &= \frac{1}{1,96 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{8,6^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 20,9)^2} = 1,762 \cdot 10^7 \text{ Па}\end{aligned}$$

где $\alpha = 0,8$ – отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении.

Напряжение в сечении Б :

Изгибающий момент в расчетном сечении

$$M_{uB} = k \cdot F_n \cdot Z = 2 \cdot 257 \cdot 0.055 = 28,27 \text{ Нм}$$

где $Z=0,055$ м – расстояние указано на эскизе вала.

Момент сопротивления при изгибе

$$W_B = 0.1 \cdot d^3 = 0.1 \cdot 0.054^3 = 1,563 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

где $d=0,054$ м – диаметр вала в сечении Б

Напряжение изгиба

$$\begin{aligned}\sigma_{npB} &= \frac{1}{W_B} \cdot \sqrt{MuB^2 + (\kappa \cdot \alpha \cdot M_n)^2} = \\ &= \frac{1}{1,563 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{28,27^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 30)^2} = 3,565 \cdot 10^7 \text{ Па}\end{aligned}$$

где $\alpha = 0,8$ – отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении.

Напряжение в сечении В:

$$M_{uB} = k \cdot F_n \cdot C \cdot \left(1 - \frac{y}{l}\right) + (G_p + T) \cdot \frac{a \cdot y}{l} =$$

$$= 2 \cdot 257 \cdot 0.055 \cdot \left(1 - \frac{0.008}{0.216}\right) + (49,4 + 298,442) \cdot \frac{0.108 \cdot 0.008}{0.216} = 28,614 \text{ Нм}$$

Момент сопротивления при изгибе

$$W_B = 0.1 \cdot d^3 = 0.1 \cdot 0.040^3 = 1,563 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

где $d=0,040$ м – диаметр вала в сечении В

Напряжение изгиба

$$\sigma_{npA} = \frac{1}{w_B} \cdot \sqrt{MuB^2 + (\kappa \cdot \alpha \cdot M_n)^2} =$$

$$= \frac{1}{1,563 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{28,614^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 30)^2} = 3,576 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

где $\alpha = 0,8$ – отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении.

Напряжение в сечении Г:

$$M_{uz} = (k \cdot F_n \cdot C \cdot \left(1 - \frac{y}{l}\right) + (G_p + T) \cdot b) \cdot \frac{X}{b} =$$

$$= (2 \cdot 257 \cdot 0.055 \cdot \left(1 - \frac{0.008}{0.216}\right) + (49,4 + 298,442) \cdot 0,108) \cdot \frac{0,008}{0.216} = 4,877 \text{ Нм}$$

Момент сопротивления при изгибе

$$W_G = 0.1 \cdot d^3 = 0.1 \cdot 0.035^3 = 1,563 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

где $d=0,035$ м – диаметр вала в сечении Г

Напряжение изгиба

$$\sigma_{npG} = \frac{1}{w_G} \cdot \sqrt{MuG^2 + (\kappa \cdot \alpha \cdot M_n)^2} =$$

$$= \frac{1}{1,563 \cdot 10^{-6}} \cdot \sqrt{4,877^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 30)^2} = 3,088 \cdot 10^7 \text{ Па}$$

где $\alpha = 0,8$ – отношение допустимого напряжения при изгибе к удвоенному допускаемому напряжению при кручении.

Выбор подшипников

Рассчитаем подшипники качения.

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник:

$$R_a = F_n \cdot \frac{\tilde{n}}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{b}{l} = 452,368 \cdot \frac{0.1}{0.357} + (443,716 + 1188,61) \cdot \frac{0.1785}{0.357} = 942,88 \text{ Н}$$

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник расположенный ближе к выходному концу вала

$$R_b = F_n \cdot \frac{\tilde{n} + l}{l} + (G_p + T_0) \cdot \frac{a}{l} = 452,368 \cdot \frac{0.1 + 0.357}{0.357} + (443,716 + 1188,61) \cdot \frac{0.1785}{0.357} = 1395,24 \text{ Н,}$$

Принимаем нагрузку с умеренными толчками ($k_n = 1.5$ – коэффициент учитывающий характер нагрузки двигателя). Для однорядных радиальных подшипников динамическая приведённая нагрузка на один подшипник:

$$Q_a = k_f \cdot R_a = 1.5 \cdot 942,88 = 1414,32 \text{ Н,}$$

Принимаем расчётный срок службы подшипников $L_{Д} = 15000$ часов, наибольшая частота вращения 1000 об / мин.

Необходимая динамическая грузоподъёмность шарикоподшипника:

$$C = \frac{Q_a}{25.6} \cdot \sqrt[3]{L_A \cdot n} = \frac{1414,32}{25.6} \cdot \sqrt[3]{15000 \cdot 1000} = 13625,05 \text{ Н,}$$

Выбираем шарикоподшипник средней серии 310, при диаметре цапфы 50 мм с динамической грузоподъёмностью $C = 35600$ Н.

Аналогично:

$$Q_b = k_f \cdot R_b = 1,5 \cdot 1395,24 = 2038,86 \text{ Н}$$

$$C = \frac{Q_b}{25.6} \cdot \sqrt[3]{L_A \cdot n} = \frac{2038,86}{25.6} \cdot \sqrt[3]{15000 \cdot 1000} = 19641,65 \text{ Н}$$

Выбираем шарикоподшипник средней серии 310, при диаметре цапфы 50 мм с динамической грузоподъёмностью $C = 35600$ Н.

Таким образом, были выбраны подшипники одной серии. Выбранные подшипники в ходе расчета удовлетворяют требованиям задания.

4.1 Вывод по главе 4

В данной главе был проведён механический расчет асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, включающий в себя расчет напряжений на изгибах сечений ротора. Из сопоставления полученных расчетных данных следует, что наиболее нагруженным является сечение А.

Так же были выбраны подшипники одной серии. Выбранные подшипники в ходе расчета удовлетворяют требованиям задания.

5 Специальная часть.

Однофазный режим работы трехфазного двигателя

Трехфазный асинхронный двигатель может быть использован без какого-либо изменения его конструкции и обмоточных данных для работы от однофазной сети в качестве:

- однофазного конденсаторного с постоянно включенной емкостью,
- однофазного с пусковой емкостью,
- однофазного с пусковым сопротивлением.

На рисунке 5.1 представлены наиболее распространенные схемы включения таких двигателей.

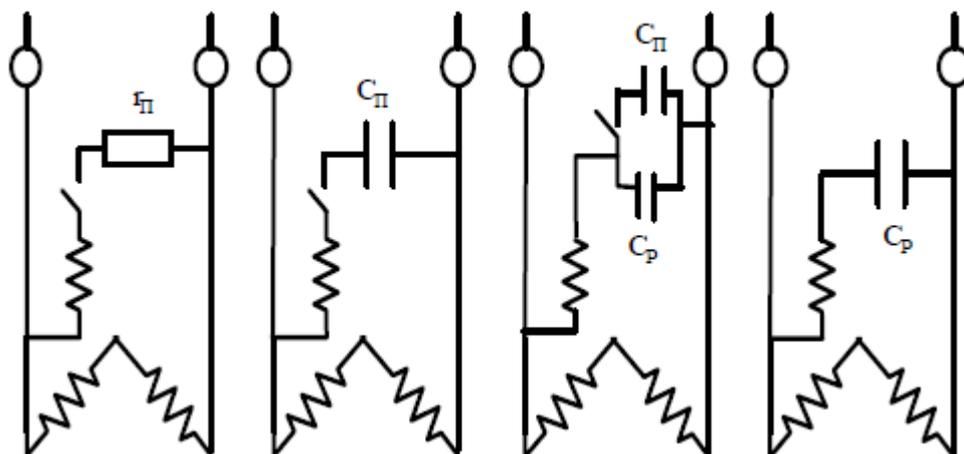


Рисунок 5.1 – Схемы однофазного включения трехфазного двигателя (с пусковым сопротивлением, с пусковой емкостью, с рабочей и пусковой емкостями, с рабочей емкостью)

В расчете была использована схема включения с постоянно включенной емкостью (рисунок 5.2).

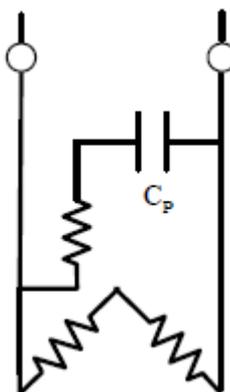


Рисунок 5.2

В указанной схеме включения трехфазного двигателя две фазы соединяются последовательно (конец с концом) и образуют рабочую обмотку А (главная фаза), а третья фаза служит вспомогательной обмоткой В.

Асинхронный двигатель, который может работать как трехфазным, так и однофазным, называется универсальным. Его универсальность оправдывается лишь в том случае, если рабочие и пусковые характеристики производной однофазной машины от трехфазной получаются не менее благоприятными, чем для трехфазной машины.

Если принять полезную мощность трехфазного двигателя за 100 %, то в этом же типоразмере можно спроектировать конденсаторный двигатель с постоянно включенной рабочей емкостью полезной мощностью, составляющей в среднем 65-70 %.

При этом может быть обеспечена удовлетворительная перегрузочная способность двигателя. Можно принять следующие соотношения:

$$M_{H2} = (0,65-0,7)M_{H3}, \text{ – для двигателя с постоянно включенной емкостью.}$$

Расчет характеристик однофазного асинхронного двигателя основан на использовании метода симметричных составляющих применительно к двухфазным системам. В соответствии с этим методом для однофазных машин применяются схемы замещения, изображенные на рисунке 5.3.

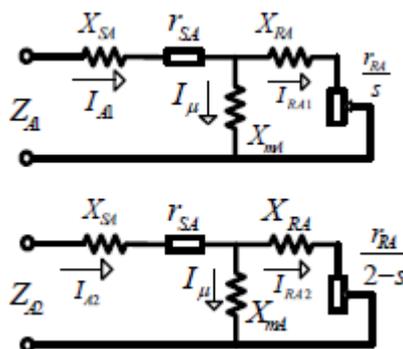


Рисунок 5.3 – Схемы замещения главной фазы

(для токов прямой и токов обратной последовательностей)

Схема замещения главной фазы состоит из двух отдельных схем соответственно для токов прямой и обратной последовательностей.

Параметры вспомогательной фазы однофазного двигателя определяют пусковые и рабочие свойства конденсаторного двигателя. Расчет вспомогательной фазы состоит в определении параметров вспомогательной обмотки и выборе добавочного элемента (конденсатора, сопротивления).

Правильный выбор емкости рабочего конденсатора обеспечивает оптимальный режим работы конденсаторного двигателя, т.е. позволяет получить круговое поле при номинальной или заданной нагрузке (заданном скольжении).

Конденсаторный двигатель является наиболее использованным однофазным двигателем, так как обе его обмотки участвуют в пуске и работе. Наличие емкости во вспомогательной фазе статорной обмотке снижает шумность двигателя.

Коэффициент трансформации для конденсаторного двигателя определяется из условия получения кругового вращающегося поля при номинальной (или заданной) нагрузке. Наиболее распространен случай, когда обмотки сдвинуты в пространстве на 90 градусов, а фазосдвигающим элементом является конденсатор. Активным сопротивлением конденсатора следует предварительно задаваться. После расчета рабочего конденсатора сопротивление уточняется по каталогу. В случае больших расхождений каталожных величин сопротивления конденсатора с принятой предварительно производится перерасчет. Емкость конденсатора округляется до ближайшего значения по каталогу, из которого берется так же значение активного сопротивления конденсатора.

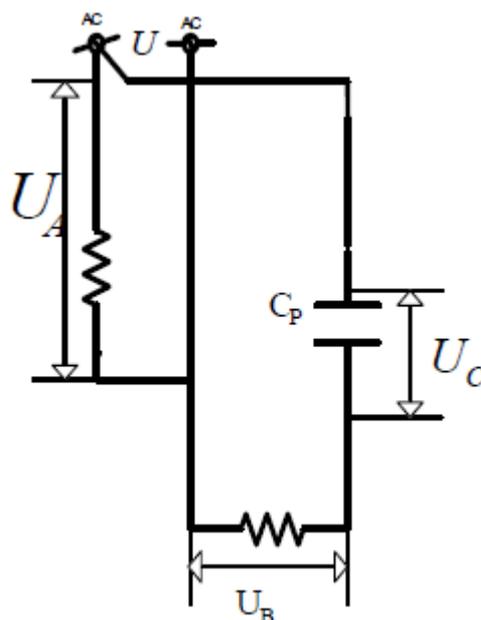


Рисунок 5.4 – Схема включения однофазного двигателя с пусковой емкостью.

Рабочие характеристики получаются для однофазной машины из уравнений, выведенных на основе метода симметричных составляющих в

применении к двухфазным системам. Связь между напряжениями, токами и параметрами однофазных машин для прямой и обратной последовательностей устанавливается на основании схем замещения однофазной машины (рис. 5.1). В однофазной машине на статоре две обмотки (главная и вспомогательная) смещены в пространстве на 90 градусов и намагничивающие силы обеих фаз неодинаковы и сдвинуты во времени на произвольный угол. В результате совместного действия этих пульсирующих намагничивающих сил возникает эллиптическое вращающееся поле.

Частными случаями эллиптического поля являются круговое и пульсирующее поля. Эллиптическое поле имеет место в конденсаторном двигателе во всем диапазоне скольжений от $S=S_0$ до $S=1$, исключением режима (обычно S_n), для которого выбранная емкость обеспечивает круговое поле. Коэффициент полезного действия двигателя при эллиптическом поле уменьшается по сравнению с двигателем, работающем при круговом поле, как за счет уменьшения полезной мощности, так и за счет увеличения подводимой мощности.

Исходными данными для выбора добавочных элементов являются расчетные или опытные данные параметры схемы замещения трехфазной машины:

r_s и x_s – активное и индуктивное сопротивление одной фазы статорной обмотки;

r_R и x_R – активное и индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенные к числу фаз и витков статора;

x_m – индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре;

$k = \frac{1}{\sqrt{3}}$ – коэффициент трансформации двухфазной машины, полученной из трехфазной.

Параметры схемы замещения для фазы А:

$r_{SA} = 2r_s$ – активное сопротивление фазы А;

$x_{SA} = 2x_S$ – индуктивное сопротивление фазы А;

$r_{RA} = k_{12}^2 \mathcal{C}r_R = 2r_R$ – активное сопротивление ротора, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы А);

$x_{RA} = 2x_R$ – индуктивное сопротивление ротора, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы А);

$x_{mA} = \frac{1}{k^2} \mathcal{C}x_m = 3x_m$ – индуктивное сопротивление, соответствующее потоку в воздушном зазоре, приведенное к числу фаз и витков статора (фазы А)

Параметры схемы замещения для фазы В:

$r_{SB} = r_S$ и $x_{SB} = x_S$ – активное и индуктивное сопротивление фазы В;

$r_{RB} = k^2 r_{RA} = \frac{1}{3} r_{RA} = \frac{2}{3} r_R$ – активное сопротивление ротора фазы В;

$x_{RB} = k^2 x_{RA} = \frac{1}{3} x_{RA} = \frac{2}{3} x_R$ – индуктивное сопротивление ротора фазы В;

$x_{mB} = k^2 x_{mA} = \frac{1}{3} x_{mA} = x_R$ – индуктивное сопротивление фазы В, соответствующее потоку в воздушном зазоре.

Исходные данные для расчета однофазного режима трехфазного асинхронного двигателя являются:

- активные и индуктивные сопротивления главной и вспомогательной фаз обмоток статора и ротора, сопротивление магнитной цепи:

$$r_{SA} = 1,74 \text{ Ом}, x_{SA} = 4,07 \text{ Ом},$$

$$r_{RA} = 1,01 \text{ Ом}, x_{RA} = 4,88 \text{ Ом},$$

$$x_{mA} = 55 \text{ Ом}, r_{SB} = 0,87 \text{ Ом}.$$

- коэффициент трансформации: $\kappa = \frac{1}{\sqrt{3}}$,

- номинальная мощность для однофазного режима:

$$P_{H2} = 5250 \text{ Вт}$$

$$P_{H2} = 0,7 \cdot P_{H3} = 0,7 \cdot 7500 = 5250 \text{ Вт}$$

- номинальное скольжение: $0,1$;
- номинальное напряжение: $U_H = 220 \text{ В}$;
- число фаз: $m=3$;
- сечение провода обмотки: $S_a = 2,345 \text{ мм}^2$;
- внешний диаметр: $D_a = 225 \text{ мм}$;
- частота сети: $f = 50 \text{ Гц}$;
- синхронная частота вращения: $n_c = 1500 \text{ об / мин}$
- частота вращения при однофазном режиме: $n = 1395 \text{ об / мин}$

5.1 Расчет номинального режима

Коэффициенты для сопротивлений разветвления:

$$\alpha = \frac{r_{RA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{1,01}{165 + 4,88} = 5,945 \cdot 10^{-3}$$

$$\beta = \frac{x_{mA}}{x_{mA} + x_{RA}} = \frac{165}{165 + 4,88} = 0,971.$$

Активное сопротивление разветвления:

$$\dot{r}_{RA1} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_{mA} \cdot s}{\alpha^2 + s^2} = \frac{5,945 \cdot 10^{-3} \cdot 0,971 \cdot 165 \cdot 0,1}{(5,945 \cdot 10^{-3})^2 + 0,1^2} = 9,492 \text{ Ом.}$$

Реактивное сопротивление разветвления:

$$\dot{x}_{RA1} = \beta \cdot x_{RA} \cdot \frac{\left(s^2 + \frac{r_{RA} \cdot \alpha}{x_{RA}} \right)}{\alpha^2 + s^2} = 0,971 \cdot 4,88 \cdot \frac{\left(0,1^2 + \frac{1,01 \cdot 5,945 \cdot 10^{-3}}{4,88} \right)}{(5,945 \cdot 10^{-3})^2 + 0,1^2} = 5,307 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление главной фазы:

$$Z_{A1} = (r_{SA} + \dot{r}_{SA1}) + j(x_{SA} + \dot{x}_{SA1}) = (4,07 + 9,49) + j(4,07 + 4,88) = 16,247 \text{ Ом.}$$

Ток в главной обмотке без учета потерь в стали:

$$I_{A1} = \frac{U_H}{Z_{A1}} = \frac{220}{16,247} = 13,541 \text{ А.}$$

Полное сопротивление разветвления:

$$\dot{Z}_{A1} = \dot{r}_{RA1} + j\dot{x}_{RA1} = 9,492 + j5,307 = 10,875 \text{ Ом.}$$

Электродвижущая сила:

$$E_1 = I_{A1} \cdot \dot{Z}_{A1} = 13,541 \cdot 10,875 = 147,258 \text{ В.}$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{\mathcal{E}} = m \cdot I_{A1}^2 \cdot \dot{r}_{RA1} = 3 \cdot 13,541^2 \cdot 9,492 = 5221 \text{ Вт.}$$

Полная механическая мощность на валу двигателя:

$$\dot{P}_R = P_{\mathcal{E}} \cdot (1 - s) = 5221 \cdot (1 - 0,07) = 4856 \text{ Вт.}$$

Полезная механическая мощность на валу:

$$P_R = \dot{P}_R - P_{\text{мех}} - P_{\text{доб}} = 4856 - 50,248 - 37,5 = 4768 \text{ Вт.}$$

где механическая мощность:

$$P_{\text{мех}} = k \cdot \left(\frac{n}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{D_a}{100} \right)^4 = 1,0075 \cdot \left(\frac{1395}{1000} \right)^2 \cdot \left(\frac{225}{100} \right)^4 = 50,248 \text{ Вт,}$$

k – коэффициент, зависящий от полюсности и внешнего диаметра статора.

$$\text{добавочные потери: } P_{\text{доб}} = 0,005 \cdot P_H = 0,005 \cdot 7500 = 37,5 \text{ Вт.}$$

$$\text{Полезный момент: } M = \frac{P_R \cdot 10^5}{1,028 \cdot n} = \frac{4768 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 1395} = 33,248 \cdot 10^4 \text{ Г} \cdot \text{см.}$$

Потери в стали статора:

$$P_{\text{cs1}} = P_{\text{cs1}} \cdot \left(\frac{E_1}{k_e \cdot U_H} \right)^2 = 159,5 \cdot \left(\frac{147,258}{0,98 \cdot 220} \right)^2 = 74,408 \text{ Вт.}$$

Потерями в стали ротора пренебрегаем.

$$\text{Ток потерь в стали: } I_C = \frac{P_{\text{cs1}}}{2 \cdot E_1} = \frac{74,408}{2 \cdot 147,258} = 0,253 \text{ А.}$$

Ток в главной обмотке с учетом потерь в стали:

$$I_{SA} = I_{A1} + I_C = 13,541 + 0,253 = 13,794 \text{ А.}$$

$$\text{Плотность тока в главной обмотке: } \Delta_A = \frac{I_{SA}}{S_a} = \frac{13,794}{2,345} = 5,882 \frac{\text{А}}{\text{мм}^2}.$$

$$\text{Коэффициент мощности главной фазы: } \cos \varphi_A = \frac{\dot{I}_{SA}}{I_{SA}} = \frac{13,541}{13,794} = 0,982.$$

Потери в меди статора: $P_{MS} = 2 \cdot I_{SA}^2 \cdot r_{SA} = 2 \cdot 13,794^2 \cdot 1,74 = 662,155 \text{ Вт}$.

Потребляемая мощность:

$$P_S = P_{\Sigma} + P_{MS} + P_C = 5221 + 662,155 + 147,258 = 6030 \text{ Вт}.$$

Коэффициент полезного действия: $\eta = \frac{P_R}{P_S} = \frac{4768}{6030} = 0,791$.

5.2 Расчет вспомогательной обмотки

Сопротивление емкость во вспомогательной обмотке:

$$x_{C\phi} = \kappa^2 \cdot x_{A1} + \kappa \cdot \kappa_{A1} = \frac{1}{3} \cdot 6,688 + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 11,232 = 8,721 \text{ Ом},$$

Емкость во вспомогательной обмотке:

$$C_p = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_{C\phi}} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 8,721} = 365,178 \text{ мкФ},$$

Принимаем $C_p = 365 \text{ мкФ}$,

тогда сопротивление емкости: $x_{Cp} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_p} = \frac{10^6}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 365} = 9 \text{ Ом}$,

Сопротивления разветвления главной фазы обратной последовательности:

$$\dot{r}_{RA2} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_{mA} \cdot (2-s)}{\alpha^2 + (2-s)^2} = \frac{0,006 \cdot 0,971 \cdot 165 \cdot (2-s)}{0,006^2 + (2-s)^2} = 0,498 \text{ Ом},$$

$$\dot{x}_{RA2} = \beta \cdot x_{RA} \cdot \frac{\frac{r_{RA}}{\alpha} \cdot \alpha + (2-s)^2}{\alpha^2 + (2-s)^2} = 0,971 \cdot 4,88 \cdot \frac{1,01 \cdot 0,006 + (2-0,07)^2}{0,006^2 + (2-0,07)^2} = 4,74 \text{ Ом},$$

$$\dot{Z}_{RA2} = \dot{r}_{RA2} + j\dot{x}_{RA2} = 0,498 + j4,74 = 4,766 \text{ Ом},$$

Полное сопротивление главной фазы обратной последовательности:

$$Z_{A2} = (r_{SA} + \dot{r}_{RA2}) + j(x_{SA} + \dot{x}_{RA2}) = 2,238 + j6,248 = 6,637 \text{ Ом},$$

$$r_{A2} = r_{SA} + \dot{r}_{RA2} = 1,74 + 0,498 = 2,238 \text{ Ом},$$

$$x_{A2} = x_{SA} + \dot{x}_{RA2} = 4,07 + j4,74 = 6,248 \text{ Ом},$$

Полные сопротивления вспомогательной фазы прямой и обратной последовательности:

$$Z_{B1} = \kappa^2 \cdot r_{A1} + j(\kappa^2 \cdot x_{A1} - x_C) = \frac{1}{3} \cdot 11,232 + j\left(\frac{1}{3} \cdot 6,688 - 9\right) = 7,737 \text{ Ом},$$

$$Z_{B2} = \kappa^2 \cdot r_{A2} + j(\kappa^2 \cdot x_{A2} - x_C) = \frac{1}{3} \cdot 2,238 + j\left(\frac{1}{3} \cdot 6,248 - 9\right) = 6,811 \text{ Ом},$$

Составляющие тока статора прямой и обратной последовательностей главной фазы:

$$I'_{A1} = U_H \cdot \frac{Z_{B2} - j\kappa \cdot Z_{A2}}{Z_{A1} \cdot Z_{B2} + Z_{A2} \cdot Z_{B1}} = 220 \cdot \frac{6,811 - j\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 6,637}{10,875 \cdot 6,811 + 6,637 \cdot 7,737} = 13,7 \text{ А.}$$

$$I'_{A2} = U_H \cdot \frac{Z_{B1} - j\kappa \cdot Z_{A1}}{Z_{A1} \cdot Z_{B2} + Z_{A2} \cdot Z_{B1}} = 220 \cdot \frac{7,737 - j\frac{1}{\sqrt{3}} \cdot 10,875}{10,875 \cdot 6,811 + 6,637 \cdot 7,737} = 17,485 \text{ А.}$$

Ток статора главной фазы без учета потерь в стали:

$$I_A = I'_{A1} + I'_{A2} = 13,7 + 17,485 = 31,185 \text{ А.}$$

Потери в стали от поля прямой последовательностей

$$\text{при } E_1 = I_{A1} \cdot Z'_{RA1} = 13,7 \cdot 16,247 = 222,584 \text{ В},$$

$$P_{CS1} = P'_{CS} \cdot \left(\frac{E_1}{U_H \cdot k_e} \right) = 159,5 \cdot \left(\frac{222,584}{220 \cdot 0,98} \right) = 170 \text{ Вт.}$$

Потерями в стали ротора пренебрегаем.

Добавочный ток от потерь в стали прямой последовательностей:

$$I_{C1} = \frac{P_{CS1}}{2 \cdot E_1} = \frac{170}{2 \cdot 222,584} = 0,382 \text{ А.}$$

Потери в стали от поля обратной последовательностей

$$\text{при } E_2 = I_{A2} \cdot Z'_{RA2} = 17,485 \cdot 4,766 = 83,334 \text{ В},$$

$$P_{CS2} = P'_{CS} \cdot \left(\frac{E_2}{U_H \cdot k_e} \right)^2 = 159,5 \cdot \left(\frac{83,334}{220 \cdot 0,98} \right)^2 = 23,289 \text{ Вт.}$$

Добавочный ток от потерь в стали обратной последовательностей:

$$I_{C2} = \frac{P_{CS2}}{2 \cdot E_2} = \frac{23,289}{2 \cdot 83,334} = 0,143 \text{ А.}$$

Токи статора с учетом потерь в стали:

$$I_{SA1} = I'_{A1} + I_{C1} = 11,947 - j9,730 + 0,382 = 14,046 \text{ А},$$

$$I_{SA2} = I'_{A2} + I_{C2} = 13,571 + j11,026 + 0,143 = 17,597 \text{ А},$$

$$I_{SA} = I_{SA1} + I_{SA2} = 14,046 + 17,597 = 31,643 \text{ A},$$

$$I_{SB1} = j \frac{I_{A1}}{k} + \frac{I_{C1}}{k} = j \frac{13,7}{1/\sqrt{3}} + \frac{0,382}{1/\sqrt{3}} = 23,711 \text{ A},$$

$$I_{SB2} = -j \frac{I_{A2}}{k} + \frac{I_{C2}}{k} = -j \frac{17,485}{1/\sqrt{3}} + \frac{0,143}{1/\sqrt{3}} = 30,252 \text{ A},$$

$$I_{SB} = I_{SB1} + I_{SB2} = 23,711 + 30,252 = 53,963 \text{ A}.$$

Плотности тока в главной и вспомогательной обмотке:

$$\Delta_A = \frac{I_{SA}}{S_a} = \frac{13,794}{2,345} = 5,882 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

$$\Delta_B = \frac{I_{SB}}{S_a} = \frac{53,963}{2,345} = 23,012 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

Полный ток сети: $I_s = I_{SA} + I_{SB} = 31,643 + 53,963 = 85,606 \text{ A}.$

Электромагнитная мощность:

$$P_{\mathcal{O}} = m \cdot I_{A1}^2 \cdot \dot{r}_{RA1} - m \cdot I_{A2}^2 \cdot \dot{r}_{RA2} = 3 \cdot 13,541^2 \cdot 9,492 - 3 \cdot 17,485^2 \cdot 0,498 = 4888 \text{ Вт}.$$

Полная механическая мощность на валу:

$$\dot{P}_R = P_{\mathcal{O}} \cdot (1 - s) = 4888 \cdot (1 - 0,07) = 4546 \text{ Вт}.$$

Полезная механическая мощность на валу:

$$P_R = \dot{P}_R - P_{\text{мех}} - P_{\text{добр}} = 4546 - 50,248 - 37,5 = 4458 \text{ Вт}.$$

Полезный момент: $M = \frac{P_R \cdot 10^5}{1,028 \cdot n} = \frac{4458 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 2910} = 14,903 \cdot 10^4 \text{ Г} \cdot \text{см}.$

Потери в меди статора:

$$P_{MS} = I_{SA}^2 \cdot r_{SA} + I_{SB}^2 \cdot r_{SB} = 13,794^2 \cdot 1,74 + 53,963^2 \cdot 0,87 = 2864,5 \text{ Вт}.$$

Потери в меди ротора:

$$P_{MS} = 2 \cdot I_{A1}^2 \cdot r_{SA1} \cdot s + 2 \cdot I_{A2}^2 \cdot r_{SA2} \cdot (2 - s) = 2 \cdot 13,74^2 \cdot 1,74 \cdot 0,1 + \\ + 2 \cdot 17,485^2 \cdot 0,498 \cdot (2 - 0,1) = 644,253 \text{ Вт}.$$

Потребляемая мощности:

$$P_S = P'_R + P_{MS} + P_{MR} + P_C = 4546 + 2864,5 + 644,253 + 170 = 8225 \text{ Вт}.$$

Сумма потерь:

$$\sum P = P_{MR} + P_{MS} + P_C + P_{мех} + P_{доб} = 4546 + 2864,5 + 644,253 + 170 + 50,248 + 37,5 = 3766,5 \text{ Вт.}$$

$$\text{Коэффициент полезного действия: } \eta = 1 - \frac{\sum P}{P_S} = 1 - \frac{3766,5}{8225} = 0,542.$$

$$\text{Коэффициент мощности главной фазы: } \cos \varphi_A = \frac{\dot{I}_{SA}}{I_{SA}} = \frac{13,541}{13,794} = 0,982.$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы:

$$\cos \varphi_B = \frac{\dot{I}_{SB}}{I_{SB}} = \frac{23,711}{53,963} = 0,439.$$

$$\text{Коэффициент мощности: } \cos \varphi_S = \frac{\dot{I}_S}{I_S} = \frac{31,643}{85,606} = 0,370.$$

Напряжение во вспомогательной обмотке:

$$U_{B1} = I_{SB1} \cdot (Z_{B1} - x_C) = -0,602 - j29,9 \text{ В,}$$

$$U_{B2} = I_{SB2} \cdot (Z_{B2} - x_C) = -0,541 + j66,219 \text{ В,}$$

$$U_B = U_{B1} + U_{B2} = -1,143 + j36,319 = 36,337 \text{ В,}$$

$$\text{Напряжение на конденсаторе: } U_C = I_{SB} \cdot Z_C = 486 \text{ В,}$$

5.3 Расчет пускового режима

Параметры схемы замещения главной обмотки:

$$r'_{RAk} = \frac{\alpha \cdot \beta \cdot x_{mA}}{\alpha^2 + 1} = \frac{0,006 \cdot 0,971 \cdot 165}{0,006^2 + 1} = 0,961 \text{ Ом.}$$

$$x'_{RAk} = \beta \cdot x_{RA} \cdot \frac{\left(\frac{r_{RA} \cdot \alpha}{x_{RA}} + 1 \right)}{\alpha^2 + 1} = 0,971 \cdot 4,88 \cdot \frac{\left(\frac{1,01 \cdot 0,006}{4,88} + 1 \right)}{(0,006)^2 + 1} = 5,719 \text{ Ом.}$$

$$Z_{Ak} = (r_{SA} + r'_{SAk}) + j(x_{SA} + x'_{SAk}) = (1,74 + 0,961) + j(4,07 + 5,719) = 2,701 + j9,789 = 10,155 \text{ Ом.}$$

$$Z_{Bk} = \kappa^2 \cdot (r_{Ak} + r_C) + j(\kappa \cdot x_{Ak} + x_C) = 3,320 + j10,906 = 11,4 \text{ Ом.}$$

Токи прямой последовательности главной фазы:

$$I'_{Ak1} = \frac{U_H}{2} \cdot \left(\frac{1}{Z_{Ak}} - \frac{jK}{Z_{Bk}} \right) = \frac{220}{2} \cdot \left(\frac{1}{10,155} - \frac{j \frac{1}{\sqrt{3}}}{11,4} \right) = 12,182 \text{ A.}$$

$$I'_{Ak2} = \frac{U_H}{2} \cdot \left(\frac{1}{Z_{Ak}} + \frac{jK}{Z_{Bk}} \right) = \frac{220}{2} \cdot \left(\frac{1}{10,155} + \frac{j \frac{1}{\sqrt{3}}}{11,4} \right) = 10,831 \text{ A.}$$

Полный ток главной обмотки: $I_{Ak} = I'_{Ak1} + I'_{Ak2} = 12,182 + 10,831 = 23,012 \text{ A.}$

Полный ток вспомогательной обмотке:

$$I_{Bk} = j \frac{I_{Ak1}}{K} - j \frac{I_{Ak2}}{K} = j \frac{12,182}{1/\sqrt{3}} - j \frac{10,831}{1/\sqrt{3}} = 2,33 \text{ A.}$$

Плотности тока в главной обмотке:

$$\Delta_{Ak} = \frac{I_{Ak}}{S_a} = \frac{23,012}{2,342} = 9,826 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

Коэффициент мощности главной фазы: $\cos \varphi_{Ak} = \frac{I_{Ak}}{I_{Ak}} = \frac{12,182}{23,012} = 0,529.$

Плотности тока во вспомогательной обмотке:

$$\Delta_{Bk} = \frac{I_{Bk}}{S_a} = \frac{2,33}{2,342} = 0,995 \frac{\text{A}}{\text{мм}^2}.$$

Коэффициент мощности вспомогательной фазы:

$$\cos \varphi_{Bk} = \frac{I_{Bk}}{I_{Bk}} = \frac{0,953}{2,33} = 0,409.$$

Полный пусковой ток: $I_K = I_{Ak} + I_{Bk} = 23,012 + 2,33 = 25,342 \text{ A.}$

Кратность пускового тока: $i_k = \frac{I_K}{I_H} = \frac{25,34}{26,13} = 0,969.$

Полный коэффициент мощности при пуске: $\cos \varphi_K = \frac{I'_K}{I_K} = \frac{23,012}{25,342} = 0,908.$

Электромагнитная мощность при пуске:

$$P_{MS} = m \cdot r_{SA1} \cdot (I_{AK1}^2 + I_{AK2}^2) = 3 \cdot 0,961 \cdot (12,182^2 + 10,831^2) = 89,63 \text{ Вт}$$

Полезный момент: $M = \frac{P_{ЭК} \cdot 10^5}{1,028 \cdot n_C} = \frac{89,63 \cdot 10^5}{1,028 \cdot 7500} = 1162 \text{ Г} \cdot \text{см.}$

Кратность пускового момента: $m = \frac{M_K}{M_H} = \frac{1162}{14903} = 0,0780 \text{ Г} \cdot \text{см}.$

Потребляемая мощность при пуске:

$$P_{SK} = U_H \cdot I_K \cos \varphi_K = 220 \cdot 25,342 \cdot 0,908 = 5062 \text{ Вт}.$$

Напряжение на вспомогательной обмотке при пуске:

$$U_{Bk} = I_{Bk} \cdot (Z_{Bk} - Z_C) = 2,33 \cdot (9,320 + j10,906 - 9) = 10,93 \text{ В}.$$

Напряжение на конденсаторе:

$$U_C = I_{Bk} \cdot Z_C = 2,33 \cdot 9 = 20,97 \text{ В}.$$

На рисунке 5.5 показаны рабочие точки в номинальном режиме работы двигателя на вентилятор при трехфазном и однофазном режимах.

По данным аэродинамическим характеристикам вентилятора, представленных на рисунке 5.6, определяем давление и подачу вентилятора при однофазном и трехфазном режиме двигателя.

При трехфазном режиме: $P = 1300 \text{ Па},$

$$Q = 2 \text{ м}^3 / \text{с},$$

при однофазном режиме: $P = 1450 \text{ Па},$

$$Q = 0,03 \text{ м}^3 / \text{с}.$$

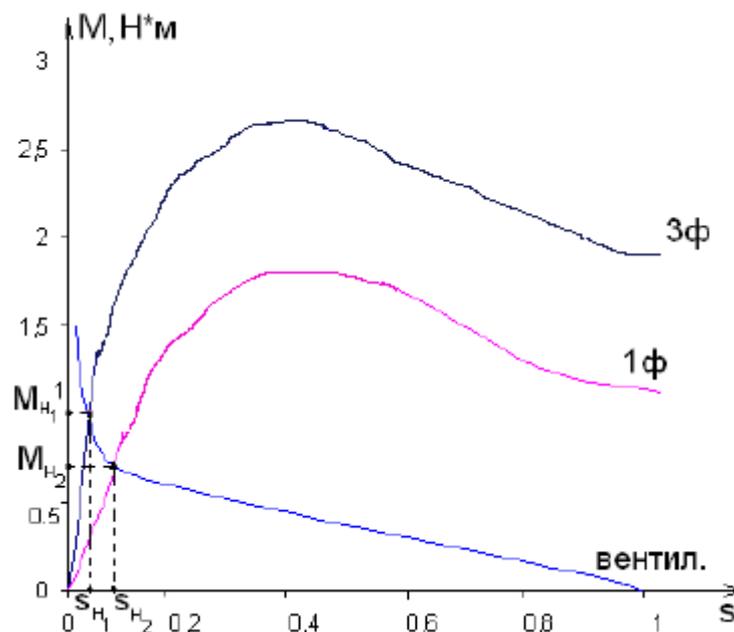


Рисунок 5.5 – Механические характеристики асинхронного двигателя на привод вентилятора при однофазном и трехфазном режимах

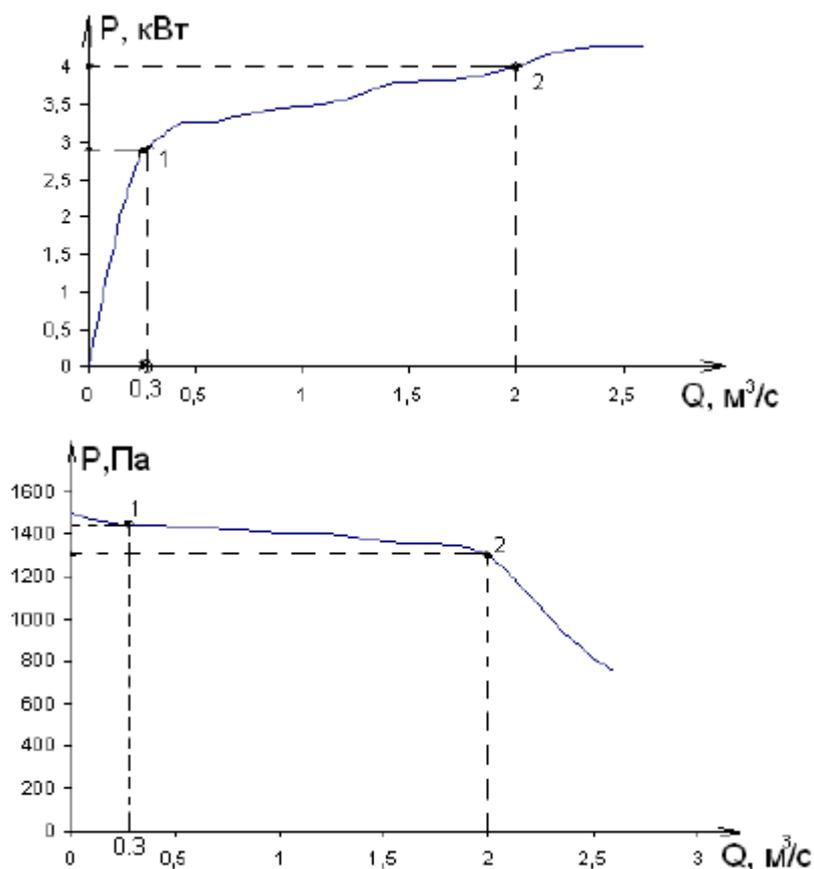


Рисунок 5.6 – Аэродинамические характеристики вентилятора.
1– однофазный режим двигателя, 2– трехфазный режим двигателя

5.4 Вывод по главе 5

В данной главе проведён расчет работы асинхронного двигателя в однофазном режиме, включающий в себя расчет работы двигателя в номинальном и пусковом режимах, а также расчет вспомогательной обмотки. При расчете пускового режима двигателя по аэродинамическим характеристикам вентилятора, определено давление и подача вентилятора при однофазном и трехфазном режиме двигателя.

задание (лист 1)

Заключение

В процессе выполнения выпускной квалификационной работы был спроектирован трехфазный асинхронный двигатель для привода вентилятора мощностью $P_{2H} = 7,5$ кВт, частотой вращения $n = 1500$ об/мин, числом полюсов $2p = 4$, напряжением $U_n = 380$ В.

В электромагнитном расчете были выбраны главные размеры, определены параметры двигателя, масса активных материалов, потери и КПД, а также рассчитаны рабочие и пусковые характеристики. Кратность пускового тока и максимального момента удовлетворяют требованиям, предъявляемым к двигателю.

Обмотка статора выбрана двухслойной, катушечной из жестких секций. Для обмотки статора применена изоляция класса Н, которая допускает длительный нагрев обмотки статора до 180^0 С. Короткозамкнутая обмотка ротора – сварная из меди.

Механический расчет вала показал, что жесткость, прочность и критическая частота вращения вала удовлетворяют требуемым условиям.

Тепловой расчет показал, что у двигателя имеется температурный запас при нагреве обмотки статора, а вентилятор обеспечивает расход воздуха почти с двукратным запасом.

При выполнении технологической части выпускной квалификационной работы была разработана общая сборка асинхронного двигателя. Посчитаны припуски на отверстие под подшипник, режимы резания для той же поверхности. Выбрано оборудование и оснастка. Определены нормы времени и необходимое количество оборудования для выполнения требуемой программы выпуска.

В разделе «Социальная ответственность» проведен анализ опасных и вредных факторов. Освещены вопросы чрезвычайной ситуации, производственной санитарии, охраны окружающей среды. Проведен расчет освещения.

В разделе «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» определена цена сборочной единицы двигателя. Произведен расчет получаемой прибыли для годовой программы выпуска, определены точка безубыточности и диапазон безопасности.

В специальной части была рассмотрена совместная работа системы вентилятор – асинхронный двигатель на примере вентилятора типа ВГПМ 20 и асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

В целом спроектированный трехфазный асинхронный двигатель для привода вентилятора удовлетворяет требованиям, определенным заданием.

Список используемых источников литературы

1. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов, Б. К. Клоков, В. П. Морозкин, Б.Ф. Токарев. – 4-е издание, дополненное. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.
2. Гурин Я. С., Кузнецов Б. И. Проектирование серий электрических машин. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
3. Матросов Ю. А. Энергосбережение. Проблемы и пути ее решения. – М.: НИИСФ, 2008. – 495 с.
4. Лезнов Б. С. Энергосбережение и регулируемый электропривод в насосных установках.
5. Тютева П. В., Муравлева О. О. Оценка стоимости модернизации асинхронных двигателей при изменении геометрии поперечного сечения / Энергетика – 2010. Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/v/Bulletin_TPU/2010/v316/i4/40.pdf, свободный (дата обращения 24.05.2016 г.)
6. Антонов М. В. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 592 с.
7. Допуски и посадки: Справочник. В 2-х ч. Ч. 1 / В.Д. Мягков [и др.]. – Л.: Машиностроение, 1982. – 543 с.
8. Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин. Серийное и крупносерийное производство. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
9. АО Томский электротехнический завод. Режим доступа: <http://tetz.ru>, свободный (дата обращения 24.05.2016 г.)
10. Криницына З. В. Ресурсоэффективность отрасли: Учебное пособие /З.В. Криницына. – Томск, издательство Томского политехнического университета, 2013. – 182 с.
11. Мегаватт. Режим доступа: <http://megavattspb.ru/>. свободный (дата обращения 24.05.2016 г.)

12. Козловский В. А. Организация производства, 2003 – 571 с.
13. ГОСТ 12.1.030-81 – Электробезопасность. Защитное заземление.
14. ГОСТ 12.4.016 -83 Одежда специальная защитная.
15. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственного помещения.
16. ГОСТ 12.1.003.-83 Шум. Общие требования безопасности
17. СП 52.13330.2011 Естественное и искусственное освещение.
18. ГОСТ 12.1.012-90 Вибрация. Общие требования безопасности
19. НПБ 105-03. Нормы пожарной безопасности. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности.
20. ГОСТ 12.1.033 – 81 Пожарная безопасность.