

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»

И.В. Бочкарев, С.В. Ширинский

**РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ**

Учебное пособие

для студентов, обучающихся
по направлению подготовки

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Москва
Издательство МЭИ
2025

УДК 621.313

ББК 31.261

Б 866

*Утверждено учебным управлением НИУ «МЭИ»
в качестве учебного издания*

Подготовлено на кафедре электромеханики Кыргызского
государственного технического университета имени И. Раззакова
и на кафедре электромеханики, электрических и электронных
аппаратов Национального исследовательского университета «МЭИ»

Рецензенты: к.т.н., доц. С.А. Нестеров (кафедра электромеханики ИВГЭУ);
д.т.н., проф. А.Б. Бакасова (каф. «Электроэнергетика» КГТУ
им. И. Раззакова);
к.т.н. С.А. Коробков (НИУ «МЭИ»)

Бочкарев, И.В.

Б 866 Расчет и конструирование асинхронных электродвигателей различных
модификаций: учеб. пособие / И.В. Бочкарев, С.В. Ширинский. – М.:
Издательство МЭИ, 2025. – 328 с.

ISBN 978-5-7046-3257-3

Изложены основы расчета и конструирования асинхронных электродвигателей. Рассмотрены вопросы оптимизации зубцовой зоны статора и ротора двигателей малой мощности. Представлена методика и пример уточненного расчета тепловых процессов. Рассмотрены методики расчета и конструирования тормозных модификаций, имеющих встроенный фрикционный электромагнитный тормоз двух типов – с пружинами сжатия и с постоянными магнитами. Все предложенные в книге методики расчета проиллюстрированы примерами их конкретной реализации.

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки 13.03.02
«Электроэнергетика и электротехника». Может быть полезно специалистам в области электроэнергетики и электротехники, разрабатывающим и применяющим асинхронные машины малой мощности.

УДК 621.313

ББК 31.261

ISBN 978-5-7046-3257-3

© И.В. Бочкарев, С.В. Ширинский, 2025

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1. КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.	
ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ,	
ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СОВРЕМЕННЫМ МАШИНАМ..... 9	
1.1. Устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей.....	9
1.2. Исполнения асинхронных электродвигателей.....	18
1.3. Основные эксплуатационные показатели, режимы работы и электромагнитная совместимость асинхронных электродвигателей.....	25
1.4. Основные конструктивные модификации и стандартизация асинхронных двигателей.....	30
Глава 2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЖИМАХ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН..... 41	
2.1. Механическая характеристика асинхронной машины.....	41
2.2. Характеристика режимов работы асинхронной машины.....	45
Глава 3. ОСНОВЫ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ..... 50	
3.1. Общие положения.....	50
3.2. Выбор базовой модели фсинхронных двигателей и основных электротехнических материалов.....	52
3.3. Электромагнитный расчет.....	55
3.3.1. Поисковый расчет.....	55
3.3.2. Проверочный расчет.....	74
3.4. Оценка работоспособности спроектированной машины.....	93
3.4.1. Вентиляционный расчет.....	93
3.4.2. Тепловой расчет.....	109
3.4.3. Механический расчет.....	114
3.5. Вопросы конструирования асинхронных электродвигателей.....	124
Глава 4. РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ..... 132	
4.1. Главные размеры машины.....	132
4.2. Обмотка и пазы статора.....	134
4.3. Воздушный зазор. Ротор.....	140
4.4. Расчет магнитной цепи.....	145

4.5. Расчет параметров Т-образной схемы замещения.....	147
4.6. Расчет потерь, не зависящих от нагрузки.....	153
4.7. Расчет выходных характеристик.....	155
4.8. Вентиляционный расчет.....	160
4.9. Тепловой расчет.....	167
4.10. Разработка конструкции.....	169
4.11. Механический расчет.....	175
Глава 5. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ.....	183
5.1. Общие вопросы оптимизации электрических машин.....	183
5.2. Обобщенный опыт проектирования асинхронных двигателей малой мощности.....	186
5.3. Оптимальные размеры зубцовой зоны.....	192
5.4. Пример выбора оптимальных размеров асинхронного конденсаторного двигателя.....	202
5.4.1. Основные размеры.....	202
5.4.2. Зубцовая зона статора и ротора.....	203
Глава 6. УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ С ПОМОЩЬЮ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ...	212
6.1. Потери в электрических машинах.....	212
6.2. Процессы нагрева и охлаждения электрических машин.....	213
6.3. Допустимая температура частей электрической машины.....	215
6.4. Основные способы передачи теплоты.....	217
6.5. Метод эквивалентных тепловых схем замещения.....	219
6.6. Тепловая схема замещения асинхронных двигателей.....	222
6.7. Тепловой расчет асинхронного двигателя по эквивалентной тепловой схеме замещения.....	223
Глава 7. РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ТОРМОЗНОЙ МОДИ ФИКАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ВСТРОЕННЫМ ПРУЖИННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ТОРМОЗОМ.....	245
7.1. Назначение, устройство и принцип действия электромеханического тормозного устройства.....	245
7.2. Выбор базовой конструктивной модификации электромеханического тормозного устройства при проектировании тормозной модификации асинхронного двигателя.....	250

7.3. Расчет параметров быстродействия электромеханического тормозного устройства	255
7.3.1. Расчет времени размыкания фрикционного узла.....	255
7.3.2. Расчет времени замыкания фрикционного узла при торможении.....	262
7.4. Методика и пример расчета пружинных электромеханических тормозных устройств для электродвигателей.....	266
7.4.1. Разработка конструкции и определение основных размеров тормоза.....	266
7.4.2. Расчет тормозного фрикционного узла.....	270
7.4.3. Расчет размеров магнитопровода и обмоточных данных растормаживающего электромагнита.....	275
7.4.4. Расчет режима срабатывания растормаживающего электромагнита.....	278
7.4.5. Расчет режима отключения растормаживающего электромагнита.....	280
7.5. Разработка конструкции тормозной модификации электродвигателя.....	282
 Глава 8. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТОРМОЗА С ИСТОЧНИКОМ ТОРМОЗНОГО УСИЛИЯ В ВИДЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ.....	286
8.1. Базовые конструкции и особенности работы электромеханических тормозных устройств с постоянными магнитами.....	286
8.2. Расчет параметров возвратной пружины.....	291
8.3. Методика и пример расчета электромеханических тормозных устройств с постоянными магнитами для электродвигателей.....	294
8.3.1. Расчет активных частей тормоза с постоянными магнитами.....	295
8.3.2. Расчет выходных параметров тормоза.....	301
8.3.3. Разработка конструкции электромеханического тормозного устройства.....	307
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	311
 СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	314
 ПРИЛОЖЕНИЯ.....	316

ВВЕДЕНИЕ

Асинхронной машиной называется двухобмоточная электрическая машина переменного тока, у которой только одна обмотка (первичная) получает питание от электрической сети с постоянной частотой, а вторая обмотка (вторичная) замыкается накоротко или на электрические сопротивления. Токи во вторичной обмотке появляются в результате электромагнитной индукции. Их частота является функцией угловой скорости ротора, которая, в свою очередь, зависит от момента нагрузки, приложенного к валу.

Наибольшее распространение получили асинхронные машины с трехфазной симметричной обмоткой на статоре, питаемой от сети переменного тока, и с трехфазной или многофазной симметричной обмоткой на роторе. Машины такого исполнения называют просто «асинхронными машинами», в то время как асинхронные машины иных исполнений относятся к «специальным асинхронным машинам». Асинхронные машины используются в основном как двигатели; в качестве генераторов они применяются крайне редко.

Сегодня в мире ежегодно выпускается порядка семи миллиардов электродвигателей. При этом наиболее распространенным типом двигателей переменного тока являются асинхронные двигатели (АД). По количеству они составляют около 90% всех электрических машин, используемых на практике. Это объясняется тем, что по сравнению с другими типами электродвигателей, АД имеют наиболее простую конструкцию и, соответственно, более надежны и имеют более низкую стоимость. Разноименнополюсная обмотка ротора асинхронного двигателя может быть короткозамкнутой (беличья клетка) или фазной (присоединяется к контактным кольцам). Наибольшее распространение имеют дешевые в производстве и надежные в эксплуатации двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе, или короткозамкнутые двигатели. Эти двигатели обладают жесткой механической характеристикой (при изменении нагрузки от холостого хода до номинальной их частота вращения уменьшается всего на 2–5%). Двигатели с короткозамкнутой обмоткой на роторе обладают также довольно высоким начальным пусковым врачающим моментом. Их основные недостатки: необходимость использования частотных преобразователей для плавного регулирования

частоты вращения в широких пределах; потребление больших токов из сети при пуске (в 5–7 раз превышающих номинальный ток); низкий коэффициент мощности при недогрузках.

Асинхронные электродвигатели находят в народном хозяйстве широкое применение. Они играют важную роль в преобразовании энергии, превращая электрическую энергию в механическую, которая используется для работы многочисленного оборудования и систем в различных отраслях. Только низковольтные АД (до 500 В питающего напряжения) мощностью от 0,12 до 400 кВт потребляют более 40% всей вырабатываемой в мире электроэнергии, а годовой их выпуск составляет сотни миллионов, покрывая самые разнообразные потребности промышленного и сельскохозяйственного производства, судовых, авиационных и транспортных систем, систем автоматики, военной и специальной техники. Асинхронные двигатели применяются в станкостроении, в приводах деревообрабатывающих, ткацких, швейных и других видов станков, кузнечнопрессовых, грузоподъемных, землеройных машин, вентиляторов, насосов, компрессоров, центрифуг, в лифтах и т.д. Практически нет отрасли техники, где не использовались бы асинхронные двигатели. Можно без преувеличения сказать, что промышленное производство приводится в движение асинхронными двигателями.

Широкое применение короткозамкнутых АД связано с рядом их достоинств. Это самые простые в конструктивном отношении и в изготовлении, надежные и самые дешевые из всех типов электрических двигателей. Они не имеют щеточно-коллекторного узла либо узла скользящего токосъема, что помимо высокой надежности обеспечивает минимальные эксплуатационные расходы. В зависимости от числа питающих фаз различают трехфазные и однофазные асинхронные двигатели. Трехфазный асинхронный двигатель при определенных условиях может успешно выполнять свои функции и при питании от однофазной сети. АД широко применяются не только в промышленности, но и в частном секторе, в быту, в домашних мастерских, на садовых участках. Однофазные асинхронные двигатели приводят во вращение стиральные машины, компрессоры

холодильников, вентиляторы, небольшие деревообрабатывающие станки, электрические инструменты, насосы для подачи воды. Чаще всего в механизмах и устройствах промышленного назначения применяют трехфазные АД.

Среду других достоинств асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором отмечают простоту конструкции; простоту пуска двигателя, легкость его автоматизации; жесткую механическую характеристику, обеспечивающую практически постоянную скорость при разных нагрузках; возможность непрерывных механических перегрузок; более высокие cosφ и КПД по сравнению с двигателями с фазным ротором.

Данное учебное пособие ориентировано на решение практических вопросов проектирования короткозамкнутых АД. Приведенные сведения позволяют освоить основные этапы проектирования электрических машин, сформировать практические навыки расчета и конструирования АД, в том числе его тормозных модификаций.

Глава 1

КОНСТРУКЦИИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СОВРЕМЕННЫМ МАШИНАМ

1.1. Устройство и принцип действия асинхронных электродвигателей

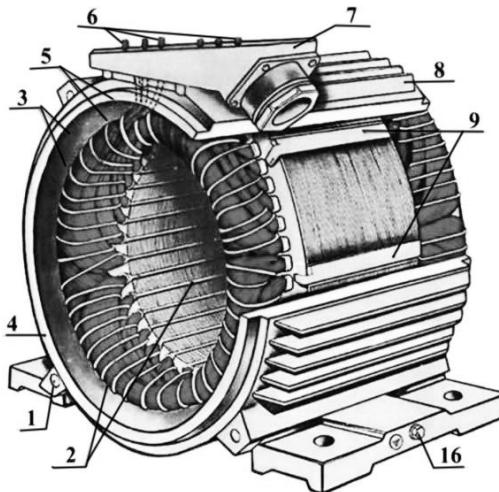
Устройство асинхронных электродвигателей. Трехфазный асинхронный двигатель традиционного исполнения, обеспечивающий вращательное движение, представляет собой электрическую машину, состоящую из двух основных частей: неподвижного статора и вращающегося ротора.

Статор двигателя состоит из электромагнитной системы, включающей магнитопровод и обмотку, и станины. Назначение электромагнитной системы – создание вращающегося магнитного поля. Магнитопровод статора состоит из тонких (от 0,28 до 1 мм) изолированных друг от друга листов, штампованных из специальной электротехнической стали, в которых предусмотрены пазы для размещения обмотки.

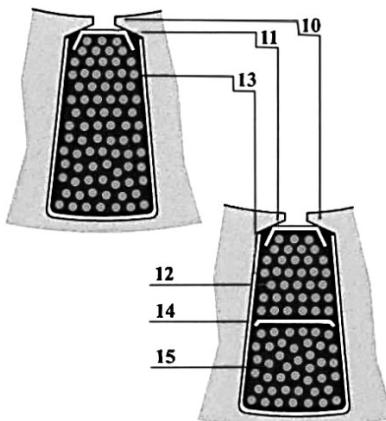
Листы собирают в пакет и скрепляют между собой различными способами: сваркой (в машинах малой мощности) или стальными скобами. Сварные швы или скобы расположены в канавках по наружной поверхности сердечника, а их количество зависит от габарита сердечника.

Пазы магнитопровода изолируют и в них укладывают распределенную трехфазную обмотку статора. Обмотка в простейшем случае состоит из трех фазных катушек, оси которых сдвинуты в пространстве по отношению друг к другу на 120° . Фазные катушки соединяют между собой по схемам звезда либо треугольник.

Магнитопровод с обмоткой запресовывают в станину. Статор в сборе показан на рис. 1.1.



a)



b)

v)

**Рис. 1.1. Статор в сборе (а) и пазы с однослойной (б)
и двухслойной (в) обмотками:**

- 1 – отверстия для крепления подшипниковых щитов;
- 2 – клин-крышка для крепления обмотки в пазу;
- 3 – бандаж крепления боковой части обмотки; 4 – станина;
- 5 – выводные концы; 6 – контактные болты коробки выводов;
- 7 – корпус коробки выводов; 8 – ребра охлаждения станины;
- 9 – скобы крепления стали сердечника; 10 – зубец статора; 11 – клин-крышка;
- 12 – верхний слой обмотки; 13 – корпусная изоляция;
- 14 – прокладка между слоями обмотки; 15 – нижний слой обмотки; 16 – болт заземления

Ротор двигателя состоит из магнитопровода, также набранного из штампованных листов электротехнической стали, с выполненными в нем пазами, в которых располагается обмотка ротора. Различают два вида обмоток ротора: фазную и короткозамкнутую. Фазная обмотка аналогична обмотке статора, соединенной в звезду. Концы обмотки ротора соединяют вместе и изолируют, а начала присоединяют к контактным кольцам, расположенным на валу двигателя. На контактные кольца, изолированные друг от друга и от вала двигателя и вращающиеся вместе с ротором, накладываются неподвижные щетки, к которым присоединяют внешние цепи. Это позволяет, изменения сопротивление ротора, регулировать скорость вращения двигателя и ограничивать пусковые токи.

Наибольшее применение получила короткозамкнутая обмотка типа «беличьей клетки». Обмотка ротора крупных двигателей включает латунные или медные стержни, которые вбивают в пазы, а по торцам устанавливают короткозамыкающие кольца, к которым припаивают или приваривают стержни (рис. 1.2).

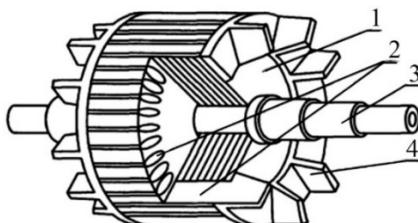


Рис. 1.2. Ротор асинхронного двигателя с короткозамкнутой обмоткой:

- 1 – магнитопровод;
- 2 – стержни обмотки;
- 3 – вал;
- 4 – короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками

Для серийных АД малой и средней мощности обмотку ротора изготавливают путем литья под давлением алюминиевого сплава. При этом в пакете ротора заодно отливаются стержни и короткозамыкающие кольца с вентиляционными лопатками для улучшения условий охлаждения двигателя, затем пакет напрессовывается на вал (рис. 1.2). Для балансировки ротора используют балансировочные грузики, которые могут крепиться на лопатках или располаться в специальных пазах, выполненных в кольцах.

Если мысленно убрать магнитопровод, то обмотка ротора будет представлять собой короткозамкнутую систему типа «беличьей клетки», состоящей из стержней, расположенных в пазу, и двух короткозамкнутых колец, расположенных по торцам магнитопровода ротора.

Общий вид асинхронного двигателя серии 4А представлен на рис. 1.3.

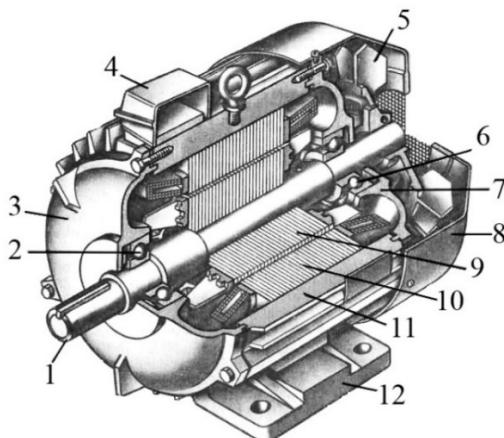


Рис. 1.3. Общий вид асинхронного двигателя серии 4А:

1 – вал; 2 – подшипник; 3 – подшипниковый щит; 4 – коробка выводов;
5 – вентилятор; 6 – подшипник; 7 – подшипниковый щит; 8 – кожух вентилятора;
9 – ротор; 10 – статор; 11 – станина; 12 – лапы

Двигатель содержит статор и ротор. Статор состоит из стального сердечника (магнитопровода) и обмотки, размещенной в пазах сердечника. Магнитопровод образует путь для замыкания магнитного потока, поэтому он изготавливается из материала с малым магнитным сопротивлением – из электротехнической стали. Кроме того, магнитопровод шихтуется, т.е. собирается из отдельных стальных пластин, изолированных друг от друга. Это делается для уменьшения вихревых токов, возникающих в процессе перемагничивания сердечника вращающимся магнитным полем. Листы собирают и скрепляют таким образом, что в сердечнике формируются зубцы и пазы статора.

Обмотка статора в зависимости от типа машин может быть трех-, двух- или однофазной. Обычно в коробку выводов выводятся начала и концы каждой фазной обмотки. Это позволяет в зависимости от величины линейного напряжения питающей сети соединять фазы обмотки статора, как звездой, так и треугольником. Если в паспорте двигателя указано: $\Delta/Y - 220/380$ В, то это означает, что при напряжении сети 220 В обмотки соединяются треугольником, а при напряжении 380 В – звездой.

Магнитопровод статора с обмоткой запрессовывают в станину (рис. 1.4). В зависимости от мощности и размеров двигателя она может быть изготовлена из стали, из алюминиевого сплава или из чугуна.

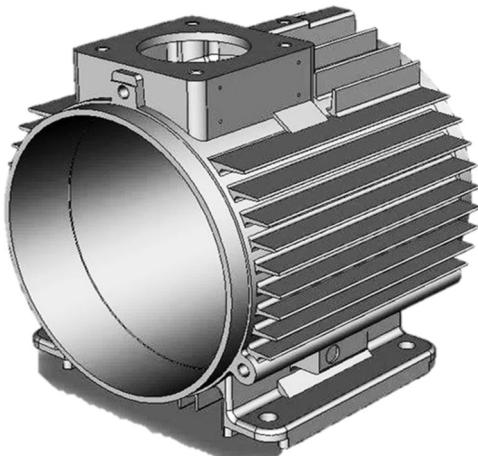


Рис. 1.4. Общий вид станины с охлаждающими ребрами

Ротор двигателя состоит из магнитопровода, также набранного из штампованных листов электротехнической стали, с выполненными в нем пазами, в которых располагается обмотка ротора. Магнитопровод закреплен на валу, на котором с двух сторон напрессованы подшипники. При сборке машины подшипники размещают в посадочные места подшипниковых щитов (рис. 1.5), которые крепятся к станине. Для повышения жесткости на подшипниковых щитах могут отливаться ребра жесткости.



Рис. 1.5. Внешний вид подшипникового щита АД

Ротор размещается внутри статора таким образом, что его сердечник находится точно внутри сердечника статора. Статор и ротор разделены воздушным зазором, который для машин небольшой мощности находится в пределах от 0,2 до 0,5 мм. Подшипники служат для уменьшения трения при вращении ротора. К свободному концу вала присоединяют нагрузку.

Для улучшения условий охлаждения машины на ее вал обычно насаживают вентилятор, который закрывают кожухом (рис. 1.6). Двигатель, изображенный на рис. 1.3, имеет закрытое обдуваемое исполнение. Поэтому для увеличения поверхности охлаждения станина имеет продольные ребра, которые играют роль радиатора.

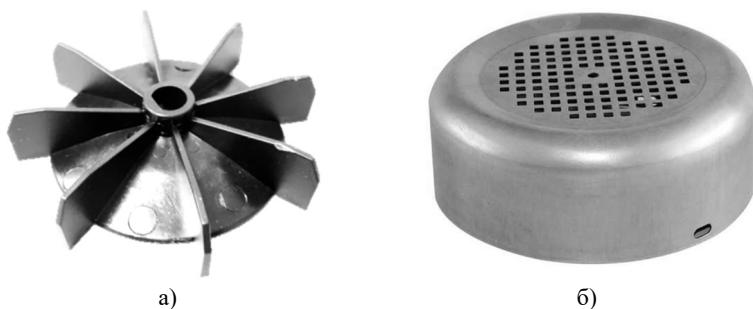


Рис. 1.6. Внешний вид вентилятора (а) и кожуха вентилятора (б)

Для прикрепления двигателя к фундаменту или непосредственно к приводимому в движение механизму на станине предусмотрены лапы с отверстиями для крепления. Выпускаются также двигатели фланцевого исполнения. У таких машин на одном из подшипниковых щитов (обычно со стороны вала) выполняют фланец, обеспечивающий присоединение двигателя к рабочему механизму. Выпускаются также двигатели, имеющие и лапы, и фланец. Внешний вид такого асинхронного короткозамкнутого двигателя показан на рис. 1.7.

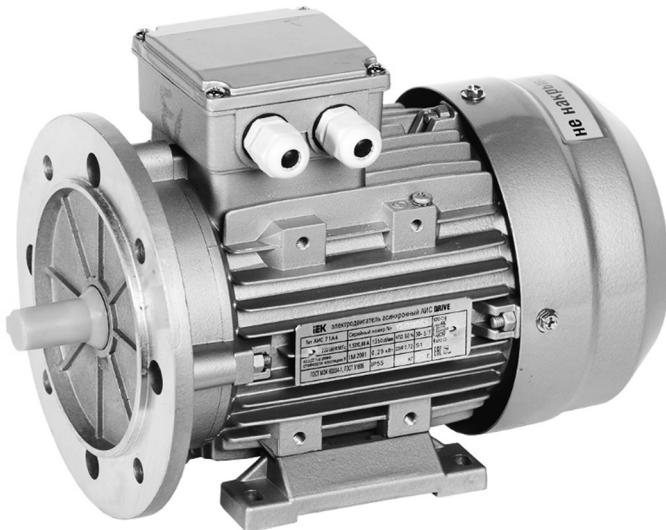


Рис. 1.7. Асинхронный двигатель с комбинированным типом крепления, совмещающим в себе лапы и фланец

Принцип действия трехфазных асинхронных двигателей.

Асинхронный электродвигатель – это электрическая машина для преобразования электрической энергии в механическую. В основе принципа действия асинхронного двигателя лежит закон электромагнитной индукции. Выше отмечалось, что трехфазная

обмотка статора служит для создания вращающегося магнитного поля двигателя. Частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения) равна

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}, \text{ об/мин,}$$

где f_1 – частота питающего напряжения; p – число пар полюсов обмотки статора.

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них электродвижущую силу, которая вызывает в замкнутой обмотке ротора протекание переменного тока. В результате этого возникают механические усилия, заставляющие ротор вращаться в сторону вращения магнитного поля. При этом частота вращения ротора n_2 меньше частоты вращения поля n_1 , т.е. ротор совершает асинхронное вращение по отношению к полю. Разница частот вращения ротора и поля статора в большинстве случаев невелика и составляет лишь несколько процентов. Поэтому частоту вращения ротора часто оценивают не в абсолютных единицах (об/мин), а в относительных, вводя понятие скольжения:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где n_1 – частота вращения поля; n_2 – частота вращения ротора.

Частота тока f_2 и ЭДС, наводимая в проводниках обмотки ротора, зависят от частоты питающей сети f_1 , ЭДС обмотки статора и от скольжения:

$$f_2 = sf_1; E'_2 = sE_1,$$

где E_1 – ЭДС обмотки статора; E'_2 – ЭДС обмотки ротора, приведенная к числу витков обмотки статора.

Под действием ЭДС в замкнутой обмотке ротора протекает ток. Его взаимодействие с магнитным полем создает электромагнитный момент, который и приводит ротор во вращение.

В случае нулевого скольжения, когда частота вращения ротора совпадает с частотой вращения поля статора, ЭДС и ток в роторе отсутствуют. Преобразование энергии в асинхронном двигателе и создание момента возможно только при различных скоростях вращения ротора и магнитного поля статора.

Принцип действия асинхронного двигателя можно рассмотреть на модели, представленной на рис. 1.8. Вращающееся магнитное поле статора представлено на нем в виде постоянного магнита, вращающегося с синхронной частотой вращения n_1 по часовой стрелке. В проводниках замкнутой обмотки ротора индуктируются токи, направления которых, найденные по правилу правой руки, показаны внутри проводников (точкой, если ток направлен «на нас», и крестиком – «от нас»).

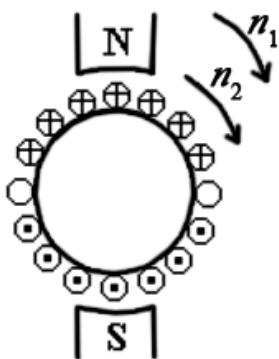


Рис. 1.8. Модель АД

Направление сил, действующих на проводники с током в магнитном поле, можно найти по правилу левой руки. Направления действия силы на всех проводниках ротора оказывается одинаковым – по часовой стрелке. Они создают вращающий момент, который и заставляет ротор вращаться в направлении вращения поля статора. Подводимая к статору электрическая энергия преобразуется при этом в механическую энергию вращения ротора.

Заметим, что в соответствии с принципом обратимости, любая электрическая машина может работать как в двигательном, так и в генераторном режиме. Асинхронный генератор может работать как на сеть переменного тока параллельно с синхронным генератором, так и на автономную нагрузку. Если с помощью приводного двигателя обеспечить вращение ротора с частотой $n_2 > n_1$, то асинхронная машина перейдет в

генераторный режим. Когда ротор движется быстрее поля статора, электромагнитный момент меняет свой знак и становится тормозящим по отношению к приводному двигателю. Механическая энергия, передаваемая этим двигателем асинхронной машине, преобразуется в электрическую и отдается в сеть, к которой подключен ее статор. Можно также обеспечить работу асинхронной машины в качестве автономного генератора, если подавать в обмотку статора необходимую реактивную мощность от батареи конденсаторов, подключенной к зажимам статора.

В обоих режимах работы асинхронная машина потребляет реактивную мощность, необходимую для создания магнитного поля.

1.2. Исполнения асинхронных электродвигателей

Асинхронные трехфазные электродвигатели с короткозамкнутым ротором единых серий (4А, АИР, АИРМ, 5АН, 6А, РА и др.) предназначены для общепромышленного применения. Любая серия АД содержит значительное количество модификаций и исполнений. На конструкцию машины в значительной мере влияют четыре фактора, которые должны быть учтены при проектировании: 1) степень защиты, 2) способ охлаждения, 3) способ монтажа и 4) условия эксплуатации [1-6].

1. Степень защиты определяет способность оболочки электрической машины обеспечивать защиту от попадания внутрь твердых посторонних тел, проникновения воды и защиту обслуживающего персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями, находящимися внутри машины.

Условное обозначение степени защиты состоит из двух латинских букв IP (начальные буквы английских слов Ingress Protection) и двух цифр. Первая цифра характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токопроводящими и врачающимися частями, находящимися внутри машины, а также степень защиты самой машины от попадания в нее твердых посторонних тел. Степень защиты здесь подразумевает предельный размер части

тела человека или инструмента или проволоки в его руках, который позволит им проникнуть внутрь машины и соприкоснуться с токоведущими или движущимися частями. Для электрических машин напряжением до 1000 В установлено шесть степеней защиты (ГОСТ IEC 60034-5-2011).

Вторая цифра характеризует обеспечивающую оболочкой степень защиты от проникновения воды внутрь машины. Машина является защищенной от климатических воздействий, если благодаря конструктивным мерам проникновение дождя, снега и частиц, находящихся в воздухе, уменьшается до такой степени, что это не мешает нормальной работе машины. Для машин существует девять степеней защиты от проникания воды внутрь машин

Для АД на напряжение до 1000 В в мировой практике приняты две основные степени защиты: закрытое IP44 и защищенное IP23.

Закрытое обдуваемое исполнение (IP44) – внутрь электродвигателя не могут попасть посторонние тела диаметром 1мм и более, а через кожух вентилятора – диаметром 12,5 мм или более, вода, разбрызгиваемая из любого направления по отношению к двигателю, не может оказать на него вредного воздействия.

Защищённое исполнение (IP23) – внутрь асинхронного двигателя не могут попасть тела диаметром 12,5 мм и более; вода, падающая в виде дождя под углом, равным или меньшим 60° к вертикали, не оказывает вредного воздействия. Иногда такое исполнение называют каплезащищенным.

2. Исполнение по способу охлаждения определяет систему вентиляции машины, а именно: вид хладагента (воздух, водород, вода и т.д.), устройство цепи для циркуляции хладагента и способ его перемещения (ГОСТ Р МЭК 60034-6-2012).

Опытом проектирования и эксплуатации электрических машин определена связка способов защиты со способами охлаждения электрических машин. Обычно АД закрытого исполнения IP44 с самоохлаждением имеют наружный обдув при помощи вентилятора, установленного на выступающем конце вала вне корпуса (рис. 1.3) и обдувающего только внешнюю поверхность двигателя (исполнение **IC0141**). При этом вентиляционные лопатки ротора

(рис. 1.2) перемешивают воздух внутри машины, направляя тем самым нагретые слои воздуха к местам их теплоотвода (к станине и подшипниковым щитам). В двигателях защищенного исполнения IP23 вентилятор установлен внутри активной части машины. В качестве примера на рис. 1.9 показана конструкция асинхронного двигателя 4АН250. Здесь применена двусторонняя симметричная радиальная система вентиляции.

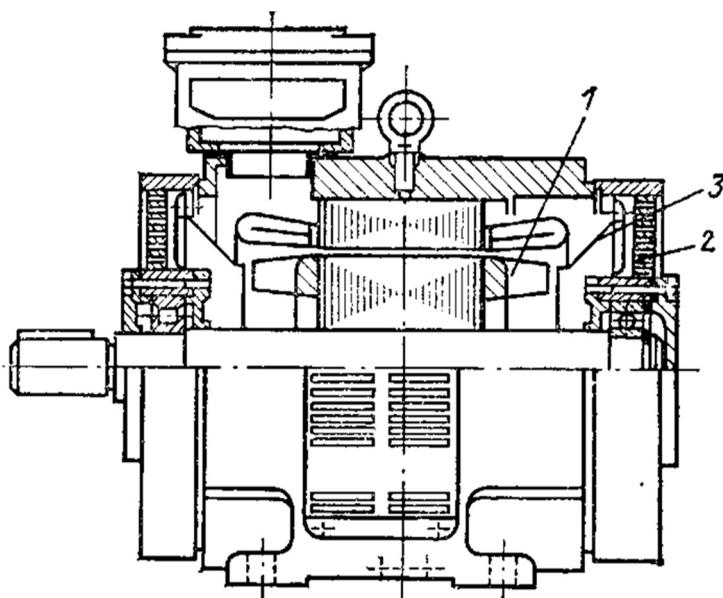


Рис. 1.9. Асинхронный двигатель 4АН250 (степень защиты IP23)

Воздух попадает в машину через вентиляционные окна в щитах, а выходит через окна в станине. Напор воздуха создается лопатками 1, отлитыми вместе с короткозамкнутой обмоткой ротора, а диффузоры 3, укрепленные на подшипниковых щитах 2, направляют поток воздуха. За счет более интенсивного охлаждения, АД исполнения IP23 имеют более высокую мощность по сравнению с аналогичным АД исполнения IP44 при тех же габаритах.

Общий вид электродвигателей защищенного и закрытого обдуваемого исполнений показан на рис. 1.10.

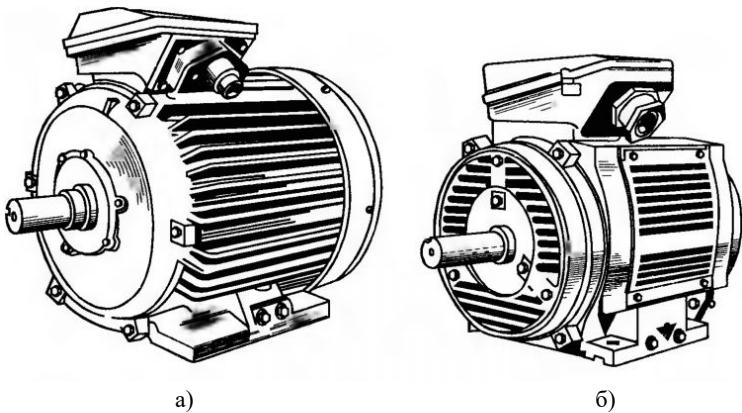


Рис. 1.10. Асинхронные двигатели серии 4А:

- а) закрытого обдуваемого исполнения;
- б) защищенного исполнения

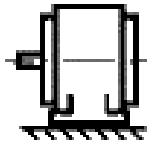
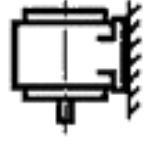
3. Способы монтажа. Монтаж электрических машин определяет способ крепления электрической машины в месте ее установки и способ ее соединения с рабочим механизмом. Монтаж машин в большинстве случаев осуществляется на лапах или посредством фланцев. При этом возможно горизонтальное или вертикальное расположение вала машины. Разновидности конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа определяются ГОСТ Р МЭК 60034-7-2012. Условное обозначение исполнения машины по способу монтажа состоит из букв IM (начальные буквы слов International Mounting) и четырех цифр. Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения, вторая и третья цифры обозначают способ монтажа, т.е. пространственное положение машины и направление выступающего конца вала.

В таблице 1.1 показаны некоторые виды конструктивных исполнений электрических машин с разными способами их монтажа и крепления.

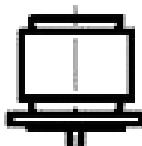
Наиболее употребительной формой исполнения являются электрические машины с горизонтальным расположением вала, с двумя щитовыми подшипниками и станиной на лапах для крепления установки на горизонтальном основании.

Таблица 1.1

Виды конструктивных исполнений электрических машин

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM1 Машины на лапах с подшипниково-выми щитами	С двумя подшипниковыми щитами на лапах, вал горизонтальный с цилиндрическим концом IM1001	
	То же, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вниз IM1011	
IM2 Машины на лапах с подшипниково-выми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах)	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом IM2001	
	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, не доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх IM2131	
IM3 Машины без лап с подшипниково-выми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах)	С двумя подшипниково-выми щитами, с фланцем на стороне выступающего конца вала, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом IM3001	

Окончание табл. 1.1

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM3 Машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах)	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне выступающего конца вала, доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом IM3011	
IM4 Машины без лап с фланцем на станине	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне выступающего конца вала, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом IM4001	
	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне выступающего конца вала, доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом IM4011	

Для крепления двигателей на поверхностях, перпендикулярных осям двигателя, на подшипниковом щите выполняют фланец (рис. 1.11).

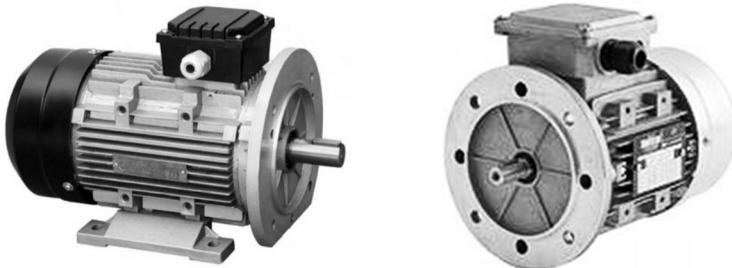


Рис. 1.11. Асинхронные двигатели с фланцевым креплением

У электрических машин с фланцевым креплением может и не быть лап. В этом случае фланец располагается на станине или на подшипниковом щите (справа на рис. 1.11).

За высоту оси вращения h электрической машины принимают расстояние от оси вращения до опорной плоскости электродвигателя (рис. 1.12, а). Толщина регулировочных прокладок, применяемых при установке, в высоту оси вращения не входит.

Для электродвигателей фланцевой формы исполнения, встраиваемых машин и машин других специальных видов крепления (на приподнятых лапах или без лап) устанавливают условную высоту оси вращения $h_{\text{ усл}}$ – расстояние от оси вращения до условной опорной плоскости машины (рис. 1.12, б).

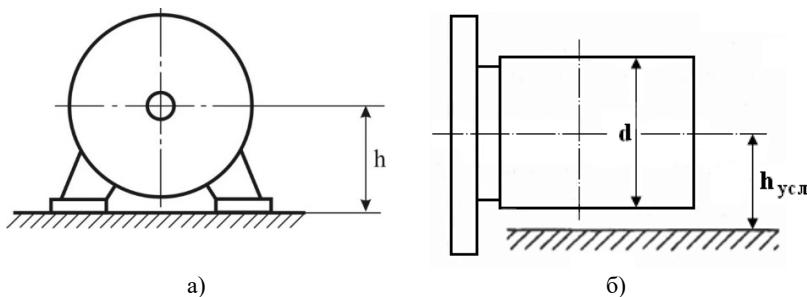


Рис. 1.12. Высота оси вращения электродвигателя:
а) двигатель на лапах; б) двигатель с фланцем

Для электродвигателей фланцевого исполнения без лап (группы IM3 и IM4 по ГОСТу Р МЭК 60034-7-2012) $h_{\text{ усл}}$ принимают равной (0,51...0,54) d , где d – диаметр наибольшей окружности, в которую вписывается корпус электродвигателя. Вычисленную условную высоту оси вращения округляют до ближайшего меньшего значения стандартной высоты оси вращения электродвигателя.

4. Климатические условия и место размещения электродвигателя устанавливают условия эксплуатации в части воздействия климатических факторов внешней среды (ГОСТ 15150-69 с изменениями).

Климатические исполнения двигателей обозначаются следующими буквами: У – для умеренного климата; ХЛ – для холодного климата; ТВ – для влажного тропического климата; ТС – для тропического сухого климата; Т – для тропического как сухого, так и влажного климата; О – для всех районов на суше (общеклиматическое исполнение); М – для морского умеренного холодного климата; ТМ – для тропического морского климата; ОМ – общеклиматическое морское исполнение; В – для всех районов на суше и море.

Категории размещения обозначаются цифрами: 1 – для работы на открытом воздухе, 2 – для помещений со сравнительно свободным доступом воздуха, 3 – для закрытых помещений, где колебания температуры, влажности, а также воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе, 4 – для помещений с искусственно регулируемыми климатическими условиями (например, закрытые отапливаемые и вентилируемые производственные помещения), 5 – для работы в помещениях с повышенной влажностью (например, невентилируемые и неотапливаемые подземные помещения, помещения, в которых возможно длительное наличие воды или частая конденсация влаги на стенах и потолке).

1.3. Основные эксплуатационные показатели, режимы работы и электромагнитная совместимость асинхронных электродвигателей

Выпускаемые заводами асинхронные двигатели предназначаются для работы в определенных условиях с определенными техническими данными, называемыми номинальными. К числу номинальных данных асинхронных двигателей, которые указываются в заводской табличке машины, укрепленной на ее корпусе, относятся:

- линейное напряжение обмотки статора $U_{1\text{lin}}$;
- частота сети f_1 ;
- механическая мощность, развиваемая двигателем, $P_n = P_{2n}$;
- линейный ток обмотки статора $I_{1\text{lin}}$;
- частота вращения ротора n_n ;
- коэффициент мощности $\cos\varphi_{1n}$;
- коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке η_n .

Номинальные данные электродвигателя соответствуют его номинальной нагрузке.

Если у трехфазной обмотки статора выведены начала и концы фаз и она может быть включена в звезду или треугольник (Y/Δ), то указываются линейные напряжения и токи для каждого из возможных соединений.

Номинальные данные асинхронных двигателей варьируются в очень широких пределах. Номинальная мощность – от долей ватта до десятков тысяч киловатт. Номинальная синхронная частота вращения при частоте сети 50 Гц составляет от 3000 до 500 об/мин и менее в особых случаях; при повышенных частотах – до 100 000 об/мин и более (номинальная частота вращения ротора обычно на 2...5% меньше синхронной; в микродвигателях – на 5...20%). Номинальное напряжение от 24 В до 10 кВ (большие значения при больших мощностях).

Основными энергетическими характеристиками двигателей являются показатели энергоэффективности и скольжение.

Показателями энергоэффективности являются коэффициент полезного действия и коэффициент мощности $\cos\phi$:

– коэффициент полезного действия (КПД) представляет отношение полезной мощности P_2 на валу двигателя к активной мощности P_1 , потребляемой двигателем из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1};$$

– коэффициент мощности $\cos\phi$ представляет отношение потребляемой активной мощности к полной мощности, потребляемой из сети:

$$\cos\phi_1 = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}}.$$

В соответствии с ГОСТ IEC 60034-30-1-2016 в зависимости от требований к уровню энергоэффективности, асинхронные двигатели общепромышленного назначения подразделяются на двигатели с

нормальным КПД и двигатели с повышенным КПД (энергосберегающие двигатели). При этом двигатели с повышенным КПД имеют суммарные потери не менее чем на 20% ниже, чем двигатели с нормальным КПД той же мощности и частоты вращения.

Номинальный КПД асинхронных двигателей возрастает с ростом их мощности и частоты вращения: при мощности более 0,5 кВт он составляет 0,65...0,95, в микродвигателях 0,2...0,65.

Коэффициент мощности $\cos\phi$ асинхронных двигателей также регламентирует ГОСТ 31605-2012. Конкретные значения КПД и $\cos\phi$ каждого двигателя указываются в каталогах.

Коэффициент мощности возрастает с ростом мощности и частоты вращения двигателей: при мощности более 1 кВт он составляет 0,7...0,9; в микродвигателях 0,3...0,7.

Скольжение s характеризует разницу между фактической частотой вращения ротора n_2 и частотой вращения магнитного поля n_1 .

Частоту вращения магнитного поля n_1 называют синхронной частотой вращения двигателя. В каталогах приводятся значения номинальной частоты вращения ротора (n_{2H}) или скольжения (s_H , %).

Универсальность питания. В настоящее время большинство стандартных асинхронных двигателей выпускают на напряжение сети 380 В при частоте 50 Гц. Вместе с тем ГОСТ 29322-2014 предусматривает переход на напряжение 400 В. При этом необходимо будет обеспечивать длительную работу двигателя при отклонениях напряжения от номинального $\pm 10\%$ (сейчас это ограничение установлено на уровне $\pm 5\%$). Для обеспечения работы двигателя при пониженном на 10% напряжении питания потребуются новые подходы при проектировании с целью создания соответствующих температурных запасов. Кроме того, одним из требований европейского рынка является обеспечение возможности работы двигателя, предназначенного для питания при напряжении 400 В и частоте 50 Гц, от сети 480 В и 60 Гц при повышенной на 20% номинальной мощности. Такую возможность также следует предусматривать при проектировании новых машин.

Режимы работы. Электродвигатели общепромышленного назначения основного исполнения могут работать в различных режимах в соответствии с ГОСТ IEC 60034-1-2014:

S1 – продолжительный режим работы – работа электродвигателя при неизменной нагрузке достаточно длительное время для достижения неизменной температуры всех его частей.

S2 – кратковременный режим работы – работа электродвигателя при неизменной нагрузке в течение времени недостаточного для достижения всеми частями электродвигателя установившейся температуры, после чего следует остановка на время, достаточное для охлаждения до температуры, не более чем на 20° превышающей температуру окружающей среды.

S3 – повторно-кратковременный периодический режим работы – последовательность одинаковых циклов работы, каждый из которых включает время работы при неизменной нагрузке, за которое электродвигатель не нагревается до установившейся температуры, и время покоя, за которое он не охлаждается до температуры окружающей среды.

S4 – повторно-кратковременный периодический режим с пусками – последовательность одинаковых режимов работы, каждый из которых включает относительно длинный пуск, время работы при неизменной нагрузке, за которое электродвигатель не нагревается до установившейся температуры, и время покоя, за которое он не охлаждается до температуры окружающей среды.

S5 – повторно-кратковременный периодический режим с электрическим торможением – режим, включающий в себя те же элементы, что и S4, с дополнительным периодом быстрого электрического торможения.

S6 – непрерывный периодический режим работы с кратковременной нагрузкой – последовательность одинаковых циклов, каждый из которых включает время работы с постоянной нагрузкой и время работы на холостом ходу, причём длительность этих периодов такова, что температура электродвигателя не достигает установленного значения.

S7 – непрерывный периодический режим с электрическим торможением – последовательность одинаковых циклов, каждый из которых включает время пуска, время работы с постоянной нагрузкой и быстрое электрическое торможение.

S8 – непрерывный периодический режим с взаимозависимыми изменениями нагрузки и частоты вращения – это последовательность одинаковых циклов, каждый из которых включает время разгона, работу с неизменной нагрузкой и частотой вращения, электрическое торможение, работу при другой частоте вращения и нагрузке, электрическое торможение и т. д.

S9 – режим с непериодическими изменениями нагрузки и частоты вращения – при этом режиме нагрузка и частота вращения изменяется не периодически в допустимом рабочем диапазоне, это допускает перегрузку, значительно превышающую базовую нагрузку.

S10 – режим с дискретными постоянными нагрузками и частотами вращения – этот режим состоит из ограниченного числа дискретных нагрузок и частот вращения, при этом каждая комбинация нагрузки / частоты вращения сохраняется достаточное время для того, чтобы машина достигла практически установленного теплового состояния. Минимальная нагрузка может иметь и нулевое значение.

Возможность использования асинхронных двигателей в тех или иных режимах определяется техническими условиями на двигатели и указывается в каталогах.

Электромагнитная совместимость. Вопросы электромагнитной совместимости (ЭМС) в настоящее время приобретают все большее значение при использовании новых серий электродвигателей. ЭМС электродвигателя определяется его способностью в реальных условиях эксплуатации функционировать при воздействии случайных электрических помех и при этом не создавать недопустимых радиопомех другим средствам. Помехи от электродвигателя могут возникать в присоединенных к нему цепях питания, заземления, управления, в окружающем пространстве.

ГОСТ Р 50034-92 устанавливает нормы на уровни устойчивости двигателей к отклонениям напряжения и частоты, несимметрии и несинусоидальности питающего трехфазного напряжения, а также методы испытания двигателей на устойчивость к помехам.

Возможность работы в системах регулируемого электропривода. При работе от преобразователя частоты (ПЧ) в ряде случаев необходимо предусматривать защиту двигателя от перенапряжения (если это не предусмотрено в системе) путем усиления витковой и корпусной изоляции. Большинство выпускаемых и применяемых в настоящее время ПЧ, рассчитанных на среднюю мощность до 3000 кВт, по своей структуре являются инверторами. Выходное трехфазное напряжение в этих ПЧ формируется методом широтно-импульсной модуляции, что приводит к воздействию на изоляцию (витковую, межфазовую) электродвигателя напряжения импульсной формы, амплитуда которого значительно превышает амплитуду первой гармоники выходного напряжения. Это приводит к преждевременному старению изоляции и снижению срока службы обмотки и двигателя в целом. Увеличение срока службы асинхронного двигателя общепромышленного применения в составе регулируемого привода может и должно быть обеспечено схемотехническими решениями ПЧ или введением специальных фильтрующих устройств в цепь питания электродвигателя. Разработка ПЧ и регулируемого электродвигателя в едином конструктивном исполнении позволяет оптимизировать систему электропривода не только по массогабаритным показателям и удобству обслуживания, но и с позиций единой системы независимого теплоотвода решить вопрос охлаждения машины на малых частотах вращения (ГОСТ IEC/TS 6034-25-2017 Часть 25. Электрические машины переменного тока, используемые в системах силового привода. Руководство по применению).

1.4. Основные конструктивные модификации и стандартизация асинхронных двигателей

Серия включает основное исполнение АД, ряд модификаций и специализированные исполнения [5,6]. Двигатели основного исполнения соответствуют общим требованиям и предназначены для нормальных условий работы (двигатели общего назначения). Они выпускаются во всем диапазоне мощностей и высот оси вращения, охватываемых серией. Это трехфазные АД с короткозамкнутым ротором, рассчитанные на частоту питания 50 Гц, имеющие степень защиты IP44 или IP23.

Двигатели основного исполнения предназначены для работы от сети переменного тока частоты 50 Гц и изготавливаются на номинальные напряжения, указанные в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Привязка номинального напряжения к мощности АД

Номинальное напряжение, В	220, 380	220, 380, 660	220/380, 380/660
Мощность, кВт	0,06...0,37	0,55...11,0	15,0...110,0

Модификации и специализированные исполнения АД построены на базе их основного исполнения, т.е. имеют те же принципиальные конструктивные решения основных элементов и высоты оси вращения. Они выпускаются отдельными отрезками серий на определенные высоты оси вращения и номинальные мощности и предназначены для применения в механизмах, предъявляющих специфические требования к электроприводу, или в условиях эксплуатации, отличных от нормальных, регламентируемых ГОСТ 31606-2024.

Структура серии предусматривает следующие группы исполнений:

- основное;
- модификации по характеристикам (с повышенным пусковым моментом, с повышенным скольжением, многоскоростные двигатели, однофазные, малошумные, двигатели с частотой питания 60 Гц);
- модификации по условиям окружающей среды (для холодного климата, для тропического климата, электродвигатели для сельского хозяйства, для работы в пыльных помещениях, для работы в химически активных средах, влагоморозостойкие, пылезащищенные);
- модификации электродвигателей по точности установочных размеров (с повышенной точностью, с высокой точностью установочных размеров);

- модификации асинхронных двигателей по конструктивному исполнению и с дополнительными устройствами (с фазным ротором, со встроенным электромеханическим тормозом, со встроенной температурной защитой);
- узкоспециализированные модификации (двигатели привода лифтов, частотно-управляемые и двигатели для привода деревообрабатывающих станков, текстильные, для моноблокнасосов, двигатели вrudничном нормальном исполнении).

Двигатели базового ряда предназначены для нормальных условий работы в электроприводах, не требующих регулирования частоты вращения. Для тяжелых условий пуска применяются двигатели с повышенным пусковым моментом, двигатели с повышенным скольжением и двигатели с фазным ротором. Под тяжелыми условиями пуска понимается пуск при постоянном статическом моменте и с моментом инерции нагрузки, не превосходящем 10-кратного значения момента инерции ротора, или пуск при параболической зависимости статического момента нагрузки от частоты вращения, но при моменте инерции нагрузки, превышающем 10-кратное значение. Для приводов, требующих регулирования скорости при постоянной частоте питающей сети, применяют многоскоростные двигатели и двигатели с фазным ротором.

Рассмотрим подробнее назначение и характеристики модификаций базового исполнения электродвигателей.

Двигатели с повышенным пусковым моментом предназначены для привода механизмов с высокими статическими или динамическими моментами на валу – транспортеров, центрифуг, поршневых компрессоров, мешалок. Эти двигатели имеют степени защиты IP44 (IP54) и высоты оси вращения 160...250 мм. Электродвигатели с повышенным пусковым моментом отличаются от базовых формой пазов ротора и обмоточными данными; все остальное полностью унифицировано. Номинальная мощность двигателей с повышенным пусковым моментом такая же, как и у базовых двигателей. Двигатели выпускаются на частоты вращения 1500, 1000 и 750 об/мин. Начальный, пусковой и минимальный моменты двигателей в 1,6 раза выше, чем у базовых дви-

гателей, максимальный момент и пусковой ток такие же, как у базовых двигателей. Энергетические показатели двигателей с повышенным пусковым моментом ниже, чем у базовых двигателей.

Двигатели с повышенным скольжением применяют для электроприводов механизмов с пульсирующей нагрузкой, частыми или тяжелыми пусками, реверсами. Номинальный режим работы для этих механизмов – повторно-кратковременный S3. Номинальная мощность на заводском щите и в каталогах указывается для продолжительности включения (ПВ) 40%.

Двигатели с повышенным скольжением изготавливают на основе двигателей базового ряда со степенью защиты IP44 (IP55), с высотами оси вращения 71...250 мм. Они отличаются от базовых двигателей только размерами паза ротора и материалом, которым залита беличья клетка. Скольжение при номинальной нагрузке у двигателей с повышенным скольжением в 2...3 раза выше, чем у базовых. Это достигается заливкой ротора сплавом повышенного сопротивления ($r = 10^{-7}$ Ом·м) и уменьшением сечения стержней ротора. Благодаря повышенному сопротивлению ротора начальный пусковой и минимальный моменты двигателя примерно соответствуют значениям этих величин у электродвигателей с повышенным пусковым моментом. Коэффициент полезного действия двигателей с повышенным скольжением ниже, чем у базовых, примерно на 5%, вследствие больших потерь в роторе.

Многоскоростные двигатели изготавливают на основе базовых со степенью защиты IP44 и IP54. Они отличаются от базовых только обмотками статора и пазами ротора. Различную частоту вращения можно получить изменением числа пар полюсов обмотки статора. Это можно достичь двумя способами: 1) размещением в пазах обмотки статора двух независимых обмоток; 2) видоизменением схемы соединений одной обмотки переключением. Наиболее широко в практике применяют переключения типа Y-YY и Δ-YY (рис. 1.13).

Комбинация из двух независимых обмоток на статоре, каждая из которых имеет переключение полюсов в соотношении 1:2, позволяет изготавливать четырехскоростные двигатели. При этом,

комбинируя схемы обмоток, добиваются такого сочетания характеристик, которые при регулировании скорости могут обеспечить либо постоянство момента $M = \text{const}$, либо постоянство мощности $P_2 = \text{const}$.

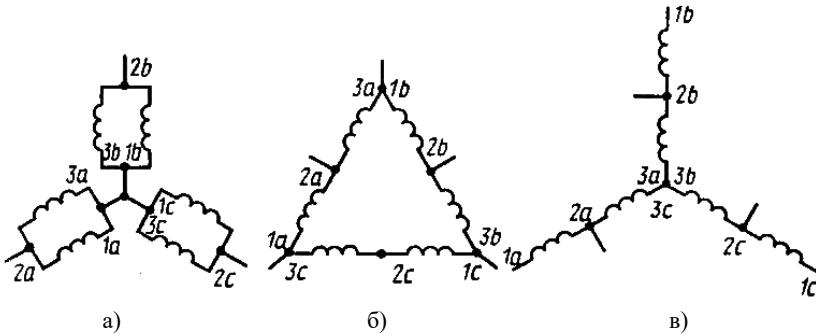


Рис. 1.13. Схемы соединения обмоток многоскоростных двигателей:
а) двойная звезда; б) треугольник; в) звезда

Выпускают многоскоростные асинхронные двигатели со следующим соотношением частот вращения: 3000/1500; 1500/100; 1500/750; 1000/500; 1000/750; 3000/1500/1000; 3000/1500/750; 1500/1000/750; 3000/1500/1000/750; 1500/1000/750/500 об/мин.

Однофазные асинхронные двигатели отличаются от трехфазных двигателей тем, что на статоре находится двухфазная обмотка, состоящая из основной (рабочей) фазы с фазной зоной 120 эл. град, которая при работе АД постоянно подключена к питающей сети, и вспомогательной (пусковой) фазы с фазной зоной 60 эл. град, которая подключается только на период запуска. Магнитные оси этих фаз обмотки смещены относительно друг друга на угол 90 эл. град.

Своевременное отключение пусковой фазы обмотки статора однофазного асинхронного двигателя от питающей сети необходимо в связи с ее конструктивным исполнением, предусматривающим кратковременный режим работы – обычно до 3 с, что исключает длительное пребывание ее под нагрузкой в связи с недопустимым перегревом, сгоранием изоляции и выходом из строя. Отключение осуществляется встроенным центробежным выключателем с размыкающими контактами, который автоматически отключает пусковую фазу при достижении ротором скорости, близкой к номинальной.

Малошумные асинхронные двигатели отличаются от машин основного исполнения следующим: 1) более точной обработкой посадочных мест и использованием подшипников более высокого класса по точности и виброшумовым характеристикам; 2) улучшенными балансировкой ротора и качеством сборки; 3) оптимальной конструкцией вентиляционного узла, обеспечивающей минимальный аэродинамический шум.

Модификации АД по условиям окружающей среды выполняются по обмоточным данным двигателей основного исполнения и отличаются от них следующим: 1) наличием соответствующих уплотнений по линии вала, щитов и вводного устройства, которые обеспечивают степень защиты IP54; 2) изоляционной системой класса нагревостойкости F; 3) защитными лакокрасочными и гальваническими покрытиями в соответствии с условиями эксплуатации.

Двигатели с повышенной точностью по установочным размерам отличаются от машин основного исполнения тем, что имеют пониженные значения следующих параметров: 1) биения выходного рабочего конца вала; 2) непараллельности оси вращения вала относительно опорной поверхности лап; 3) неплоскости опорной поверхности лап; 4) радиального и торцевого биения посадочных и опорных поверхностей.

Двигатели со встроенной температурной защитой изготавливаются на базе машин основного исполнения путем встраивания термодатчиков в лобовые части обмотки статора по одному в каждую фазу. В качестве термодатчиков применяют полупроводниковые терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Датчики соединяются в последовательную цепь, концы которой выводятся на клеммы коробки выводов. При эксплуатации АД к этим клеммам подключают исполнительное устройство, например, реле, отключающее АД при превышении допустимого нагрева. Такая система обеспечивает защиту двигателя как в режимах медленного нагревания (перегрузка, работа на двух фазах), так и в режимах с быстрым нагреванием (заклинивание ротора и др.).

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором показан на рис. 1.14.

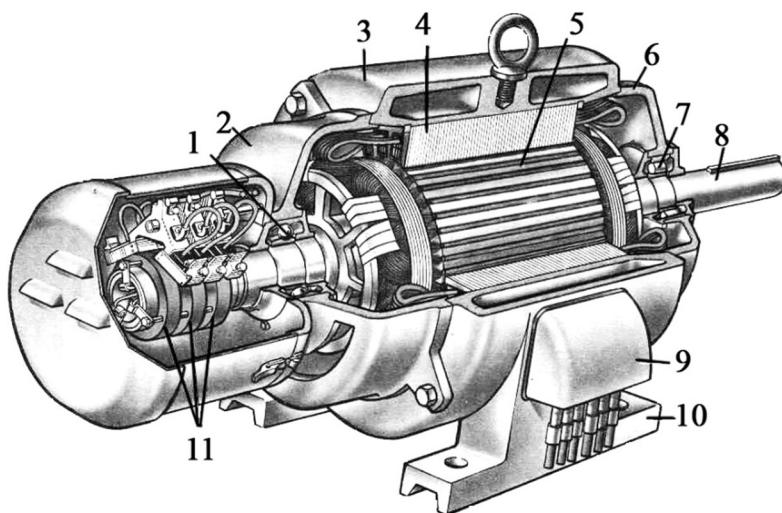


Рис. 1.14. Асинхронный двигатель с фазным ротором:

- 1, 7 – подшипники;
- 2, 6 – подшипниковые щиты;
- 3 – корпус;
- 4 – сердечник статора;
- 5 – сердечник ротора;
- 8 – вал;
- 9 – коробка выводов;
- 10 – лапы;
- 11 – контактные кольца

Магнитопровод (сердечник) статора 4 двигателя с фазным ротором полностью аналогичен статору двигателя с короткозамкнутым ротором. Ротор двигателя состоит из шихтованного магнитопровода 5, в пазах которого располагается обмотка ротора.

Магнитопровод закреплен на валу 8, на котором с двух сторон напрессованы подшипники 1, 7. К станине 3 крепятся подшипниковые щиты 2 и 6, которые имеют посадочные места для размещения в них подшипников 1 и 7. Фазная обмотка ротора аналогична обмотке статора, соединенной в звезду. Концы обмотки ротора соединяют вместе и изолируют, а начала присоединяют

к контактным кольцам 11, располагающимся на валу двигателя. К контактным кольцам, изолированным друг от друга и от вала двигателя и вращающимся вместе с ротором, прижаты неподвижные щетки, расположенные в щеткодержателе (рис. 1.15). К щеткам присоединяют внешние цепи. Это позволяет вводить в цепь ротора добавочные сопротивления и регулировать тем самым скорость вращения двигателя и ограничивать пусковые токи.

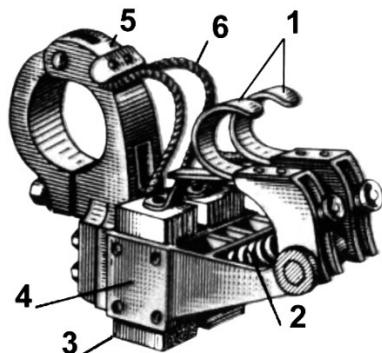


Рис. 1.15. Щеткодержатель:

- 1 – нажимной курок;
- 2 – пружина;
- 3 – щетка;
- 4 – обойма;
- 5 – зажим;
- 6 – гибкий токопровод к щетке

Принципиальная схема включения асинхронного двигателя с фазным ротором показана на рис.1.16.

Асинхронные двигатели с фазным ротором имеют более сложную конструкцию, чем двигатели с короткозамкнутым ротором. Соответственно, они и менее надежны. Но они обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами за счет того, что в них при помощи скользящего контакта, образованного контактными кольцами и щетками, можно ввести в цепь ротора добавочное сопротивление $R_{\text{доб}}$, которое будет выполнять функции пускового ПР или регулировочного реостата.

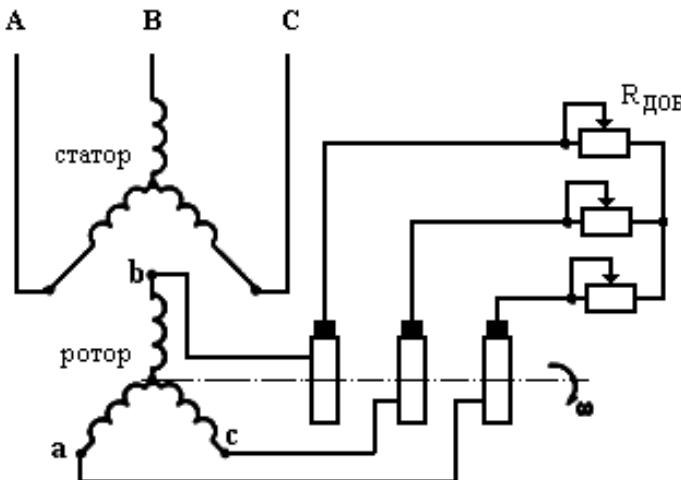


Рис. 1.16. Принципиальная схема включения АД с фазным ротором

Двигатели со встроенным электромеханическим тормозом предназначены для привода механизмов, где по условиям технологического процесса требуется быстрая принудительная остановка и фиксация вала после отключения питания. Применение таких двигателей уменьшает длительность цикла, а, следовательно, способствует увеличению интенсивности производства. Использование механического торможения вместо электрического выгодно тем, что тепло, выделяемое в процессе торможения, рассеивается не двигателем, а тормозным устройством, поэтому двигатель нагревается значительно меньше и частота циклов может быть повышена. Тормозное устройство располагается внутри корпуса двигателя со стороны, противоположной выступающему концу вала, и осуществляет быстрое торможение двигателя при отключении питания. При подаче напряжения на двигатель происходит его растормаживание. Тормозная система приводится в действие электромагнитом переменного или постоянного тока, последний питается от сети через выпрямитель. В двигателях сравнительно большой мощности (с высотой оси вращения 160 мм) для

ускорения растормаживания применяется форсирование усилия путем подачи при пуске на электромагнит повышенного напряжения, пропорционального пусковому току.

Вопросы проектирования двигателей со встроенным электромеханическим тормозом будут рассмотрены ниже в главах 7 и 8.

Стандартизация АД. Широкое применение, а также развитие международной торговли привело к необходимости стандартизации асинхронных двигателей, как национальной, так и международной. Международная стандартизация асинхронных двигателей осуществляется международной электротехнической комиссией – МЭК (International Electrotechnical Commission – IEC). В связи с этим во всех промышленно развитых странах низковольтные АД общего назначения называются стандартными асинхронными двигателями. Стандартизация охватывает практически все характеристики двигателей:

- 1) номинальная мощность;
- 2) синхронная частота вращения;
- 3) напряжение и частота;
- 4) энергетические характеристики;
- 5) механические характеристики и пусковые свойства;
- 6) режимы работы;
- 7) степень защиты и способы охлаждения;
- 8) монтажные исполнения;
- 9) установочно-присоединительные размеры;
- 10) виброшумовые характеристики;
- 11) условия эксплуатации: температура окружающей среды, высота над уровнем моря, механические воздействия;
- 12) сервис-фактор.

В соответствии с ГОСТ 31606-2024 **сервис-фактор** определяется, как допустимая перегрузка электродвигателя при номинальных напряжении и частоте. При этом превышение температуры обмотки не должно быть больше допустимого для данного класса нагревостойкости системы изоляции, на 10%.

Декларирование сервис-фактора означает, что двигатель, работающий при номинальных напряжении и частоте, может быть перегружен до мощности, получаемой путем умножения номинального

значения на сервис-фактор. Обычно сервис-фактор принимают равным 1,15, реже – 1,1. При этом превышение температуры обмоток должно быть не более 90° и 115° для систем изоляции класса нагревостойкости В и F соответственно.

При проектировании АД необходимо выполнить все требования стандартов, предъявляемые к их характеристикам и параметрам.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Опишите конструкцию активных частей асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Какие конструктивные элементы АД входят в состав корпуса и системы охлаждения?
3. Объясните принцип действия трехфазных асинхронных двигателей.
4. В каких случаях обмотка статора соединяется в «звезду», а в каких в «треугольник»?
5. Как обозначается степень защиты электрической машины? Что она определяет?
6. Как обозначается исполнение по способу охлаждения электрической машины? Что оно определяет?
7. Перечислите виды конструктивных исполнений электрических машин и их обозначения.
8. Как обозначаются климатические условия и категория размещения электрической машины? Что они определяют?
9. Перечислите и поясните основные эксплуатационные показатели, которыми характеризуются асинхронные электродвигатели.
10. Перечислите основные и дополнительные номинальные режимы работы.
11. Опишите структуру единых серий АД. Какие основные модификации базового исполнения существуют?
12. В чем заключаются конструктивные особенности асинхронных электродвигателей с фазным ротором?

Глава 2

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О РЕЖИМАХ РАБОТЫ АСИНХРОННЫХ МАШИН

2.1. Механическая характеристика асинхронной машины

Теоретически асинхронная машина может работать в диапазоне изменения скольжения s от $-\infty$ до $+\infty$ (рис. 2.1), но не при $s = 0$, так как в этом случае $n_2 = n_1$ и проводники обмотки ротора неподвижны относительно поля статора, ЭДС и ток в обмотке равны нулю и момент отсутствует.

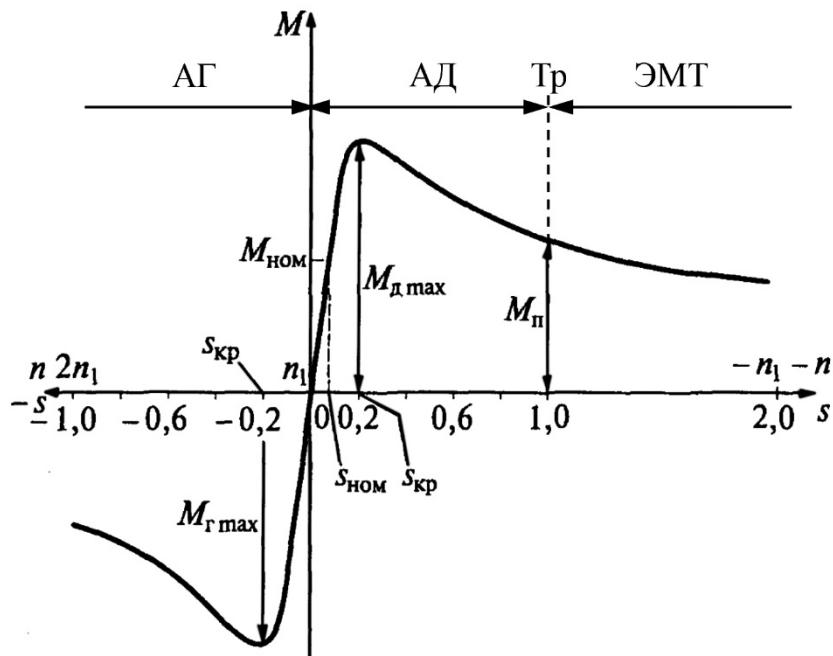


Рис. 2.1. Механическая характеристика асинхронной машины

Различают несколько режимов работы асинхронных машин (рис. 2.1): генераторный режим при $s < 0$, двигательный при $0 < s < 1$, трансформаторный при $s = 1$ и тормозной при $s > 1$.

В генераторном режиме (АГ) ротор машины вращается в ту же сторону, что и поле статора, но с большей частотой.

В двигательном режиме (АД) направления вращения поля статора и ротора совпадают, но ротор вращается медленнее поля статора: $n_2 = n_1(1 - s)$.

В трансформаторном режиме (Тр) ротор машины неподвижен и обмотки ротора и статора не перемещаются относительно друг друга. Асинхронная машина в таком режиме представляет собой трансформатор и отличается от него расположением первичной и вторичной обмоток (обмотки статора и ротора) и наличием воздушного зазора в магнитопроводе. Отметим, что в трансформаторном режиме применяют только двигатели с фазным ротором, ротор которых заторможен червячной передачей, с помощью которой можно принудительно изменять его угловое положение относительно статора. Такие машины используют в качестве потенциал-регуляторов или фазорегуляторов.

В тормозном режиме (ЭМТ) ротор вращается, но направление его вращения противоположно направлению поля статора, и машина создает электромагнитный момент, противоположный механическому моменту, действующему на вал. Этот режим применяется для быстрого останова. При этом торможение вращающегося вала можно обеспечить двумя способами:

- переводом АД в режим *генераторного торможения* с отдачей энергии в сеть (если фактическая частота вращения ротора превышает частоту вращения поля статора, то двигатель начинает генерировать электрическую энергию и отдавать её в питающую сеть, в результате чего и создаётся тормозящий генераторный момент), но при этом возможно затормозить ротор лишь до синхронной частоты вращения.

- переводом АД в режим *противовключения* (для этого нужно изменить порядок чередования фаз на зажимах статора, за счет чего вращающееся поле статора сразу изменит направление вращения, а ротор по инерции будет вращаться в прежнем направлении).

В тормозном режиме ЭМТ обычный общепромышленный асинхронный двигатель может работать только кратковременно из-за большого выделения тепла.

Подавляющее большинство асинхронных машин используют в качестве двигателей, и лишь очень небольшое количество – в генераторном и трансформаторном режимах.

Пусковой режим, который соответствует началу работы двигателя, когда питание уже подано на обмотку статора, а ротор еще не начал вращаться, также аналогичен трансформаторному режиму и режиму короткого замыкания двигателя. Пусковой режим двигателя характеризуется кратностями пускового момента M_{II}^* и пускового тока I_{II}^* (рис. 2.2). При $s = 1$ ток I_{II} в несколько раз превышает номинальный $I_{\text{I}_{\text{ном}}}$, а охлаждение машины много хуже, чем при номинальном режиме, поскольку ротор не вращается, а с ним не вращается и вентилятор. Поэтому в режиме пуска АД может находиться лишь в течение очень короткого времени, чтобы не допустить превышение допустимой температуры изоляции обмоток.

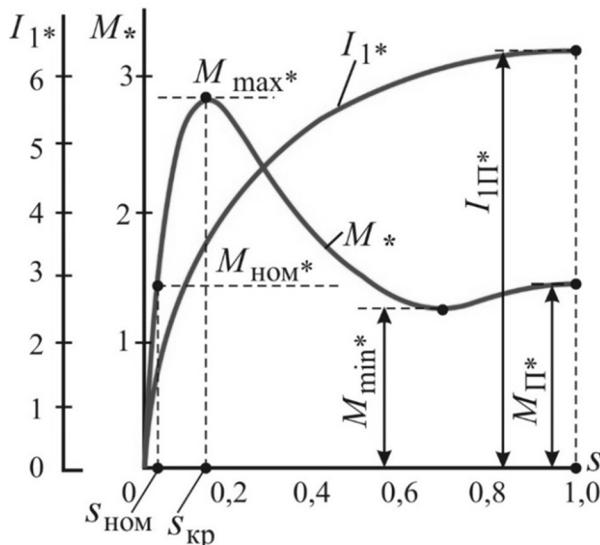


Рис. 2.2. Зависимость тока и момента асинхронного двигателя от скольжения

В режим короткого замыкания двигатель может перейти в случае, если момент сопротивления нагрузки превысит максимальный момент двигателя. В этом случае ротор двигателя остановится, но статор продолжит потреблять из сети ток, аналогичный пусковому току, что быстро приведет к превышению допустимой температуры его обмоток и к выходу двигателя из строя.

Перегрузочная способность асинхронных электродвигателей характеризуется отношением максимального момента двигателя M_{\max} к его номинальному моменту $M_{\text{ном}}$. В зависимости от величины мощности и назначения двигателя отношение $M_{\max} / M_{\text{ном}}$ колеблется примерно в пределах 1...3.

Для оценки механической характеристики асинхронного двигателя моменты, развиваемые двигателем при различных скольжениях, обычно выражают не в абсолютных, а в относительных единицах, т.е. указывают кратность по отношению к номинальному моменту: $M^* = M/M_{\text{ном}}$.

Зависимость $M^* = f(s)$ асинхронного двигателя (рис. 2.2) имеет несколько характерных точек, соответствующих пусковому $M_{\text{п*}}$, минимальному $M_{\min*}$, максимальному $M_{\max*}$ и номинальному $M_{\text{ном*}}$ моментам.

Пусковой момент $M_{\text{п*}}$ характеризует начальный момент, развиваемый двигателем непосредственно при включении его в сеть при неподвижном роторе ($s = 1$). После трогания двигателя с места его момент несколько уменьшается по сравнению с пусковым (рис. 2.2). Обычно $M_{\min*}$ на 10...15% меньше $M_{\text{п*}}$. Большинство двигателей проектируют так, чтобы их $M_{\min*}$ был больше $M_{\text{ном*}}$, так как они могут достигнуть номинальной скорости лишь при условии, что момент сопротивления на валу будет меньше, чем $M_{\min*}$.

Максимальный момент $M_{\max*}$ характеризует перегрузочную способность двигателя. Если момент сопротивления превышает $M_{\max*}$, двигатель останавливается. Поэтому $M_{\max*}$ называют также критическим, а скольжение, при котором момент достигает максимума, – критическим скольжением $s_{\text{кр}}$. Обычно $s_{\text{кр}}$ не превышает 0,1...0,15; в двигателях с повышенным скольжением (крановых, металлургических и т. п.) $s_{\text{кр}}$ может быть значительно

большим. Диапазон скольжений $0 < s < s_{kp}$ соответствует зоне устойчивой работы двигателя, она считается рабочей частью механической характеристики двигателя. Под устойчивостью работы электродвигателя понимают его способность восстанавливать исходную частоту вращения при небольших кратковременных возмущающих воздействиях (например, при изменении величины нагрузки на валу или величины питающего напряжения).

При скольжениях $s > s_{kp}$ двигатель не может устойчиво работать с постоянной скоростью. Эта часть характеристики определяет пусковые свойства двигателя от момента пуска до выхода на рабочую часть характеристики.

2.2. Характеристика режимов работы асинхронной машины

В двигательном режиме под воздействием электромагнитного момента $M > 0$, направленного в сторону вращения поля, ротор машины вращается в ту же сторону со скоростью, меньшей, чем скорость поля ($\Omega_1 > \Omega > 0$, $0 < s < 1$). В этом режиме электромагнитная $P_{\text{эм}}$ и механическая $P_{\text{мех}}$ мощности равны соответственно:

$$P_{\text{эм}} = M\Omega_1 = \frac{P_{\text{э2}}}{s} > 0; \quad P_{\text{мех}} = M\Omega = P_{\text{э2}} \frac{1-s}{s} > 0.$$

Потребляемая электрическая мощность $P_1 = P_{\text{эм}} + P_{\text{м}} + P_{\text{э1}} > 0$ преобразуется в полезную механическую мощность $P_2 = P_{\text{мех}} - P_{\text{д}} = P_{\text{э2}} > 0$, передаваемую через вал приводимой в движение машины. В этих выражениях обозначено: $P_{\text{м}}$ – магнитные потери (в магнитопроводе статора); $P_{\text{э1}}$ и $P_{\text{э2}}$ – электрические потери в обмотках статора и ротора соответственно; $P_{\text{мех}}$ и $P_{\text{д}}$ – механические и добавочные потери.

В двигательном режиме направление активной составляющей тока ротора i_{2a} совпадает с индуцированной в роторе ЭДС. Направление электромагнитного момента M определяется электромагнитной силой $B_m i_{2a}$, действующей на ток i_{2a} .

Полезная механическая мощность P_2 оказывается меньше потребляемой из сети мощности на величину потерь ΣP :

$$P_2 = P_1 - \Sigma P = P_1 - (P_{\text{э}1} + P_{\text{м}} + P_{\text{э}2} + P_{\text{д}} + P_{\text{т}}).$$

КПД двигателя выражается формулой:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\sum P}{P_1}.$$

В режиме генератора под воздействием внешнего момента $M_{\text{в}} > 0$, направленного в сторону вращения поля статора, ротор машины вращается со скоростью, превышающей скорость поля статора ($\Omega > \Omega_1, s < 0$). В этом режиме величина скольжения ротора относительно поля статора становится отрицательной и активная составляющая тока ротора I'_{2a} изменяет свое направление на обратное (по сравнению с двигательным режимом). Поэтому электромагнитный момент $M = B_m I_{2a}$, уравновешивающий внешний момент, направлен против направления вращения поля и считается отрицательным ($M < 0$), мощности электромагнитная $P_{\text{эм}}$ и механическая $P_{\text{мех}}$ также отрицательны, что означает обратное направление мощности:

$$P_{\text{эм}} = M\Omega_1 = \frac{P_{\text{э}2}}{s} < 0; \quad P_{\text{мех}} = M\Omega = P_{\text{э}2} \frac{1-s}{s} < 0.$$

Направление преобразования энергии изменяется на обратное: механическая мощность $P_{\text{мех}}$, подведенная к валу машины, преобразуется в электрическую мощность $P_{\text{эл}}$, поступающую в сеть.

Поскольку мощность потерь всегда положительна (в любом режиме работы эти мощности превращаются в тепло), механическая мощность $P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - P_{\text{э}2} < 0$ при $s < 0$ по абсолютному значению больше, чем электромагнитная: $|P_{\text{мех}}| = |P_{\text{эм}}| + P_{\text{э}2}$.

По той же причине потребляемая механическая мощность по абсолютному значению на потери больше электрической мощности, отдаваемой в сеть $|P_2| = |P_1| + \Sigma P$, и КПД генератора:

$$\eta = \frac{|P_1|}{|P_2|} = 1 - \frac{\sum P}{|P_2|}.$$

В режиме тормоза под воздействием внешнего момента $M_b < 0$, направленного против вращения поля, ротор машины вращается в сторону, противоположную полю ($\Omega < 0, s = (\Omega_l - \Omega) / \Omega_l > 1$). В этом режиме электромагнитный момент M , уравновешивающий внешний момент, как и в режиме двигателя (направление вращения поля относительно ротора остается таким же, как в режиме двигателя), направлен в сторону поля и считается положительным ($M > 0$). Однако, поскольку $\Omega < 0$, механическая мощность оказывается отрицательной:

$$P_{\text{мех}} = M\Omega = P_{s2} \frac{1-s}{s} < 0.$$

Это означает, что она подводится к асинхронной машине. Электромагнитная мощность в этом режиме положительна:

$$P_{\mathcal{M}} = M\Omega_l = \frac{P_{s2}}{s} > 0.$$

Это означает, что она поступает из сети в машину.

Подвенные к ротору машины со стороны сети $|P_{\mathcal{M}}|$ и вала $|P_{\text{мех}}|$ мощности превращаются в электрические потери P_{s2} в сопротивлении ротора R'_2 :

$$|P_{\text{мех}}| + |P_{\mathcal{M}}| = P_{s2} \frac{1-s}{s} + P_{s2} \frac{1}{s} = P_{s2} = m_l R'_2 (I'_2)^2.$$

Асинхронная машина в этом режиме может быть использована, например, для притормаживания опускаемого подъемным краном груза. При этом мощность $|P_{\text{мех}}| = |M\Omega|$ поступает в ротор машины.

В режиме идеального холостого хода внешний вращающий момент $M_{\text{в}}$, момент трения $M_{\text{т}} = P_{\text{т}}/\Omega$ и момент, связанный с добавочными потерями, $M_{\text{д}} = P_{\text{д}}/\Omega$ равны нулю. Ротор вращается со скоростью поля ($\Omega = \Omega_1$, $s = 0$) и не развивает полезной механической мощности ($M = 0$, $P_{\text{мех}} = M\Omega = 0$).

Режим реального холостого хода асинхронной машины аналогичен режиму холостого хода трансформатора. Ток в этом режиме имеется только в первичной обмотке $I_1 \neq 0$, а во вторичной – отсутствует ($I_2 = 0$). В машине и в трансформаторе магнитное поле образуется в этом режиме только первичным током, что позволяет называть ток холостого хода намагничивающим током ($I_1 = I_0$). В отличие от трансформатора система токов I_0 в фазах многофазной обмотки статора образует вращающееся магнитное поле.

В режиме короткого замыкания под действием внешнего момента $M_{\text{в}}$, уравновешивающего электромагнитный момент M , ротор удерживается в неподвижном состоянии ($s = 1$) и не совершает полезной механической работы ($P_{\text{мех}} = M\Omega = 0$). Направление тока i_{2a} и электромагнитного момента M остается таким же, как в режиме двигателя, и $M > 0$. Электромагнитная мощность $P_{\text{эм}} = M\Omega_1 > 0$ – она поступает в ротор из статора и превращается в электрические потери ($P_{\text{эм}} = P_{32}$). В этом режиме асинхронная машина работает как короткозамкнутый со второй стороны трансформатор, отличаясь от него только тем, что в ней существует вращающееся поле взаимной индукции вместо пульсирующего поля в трансформаторе.

Изменить режим работы асинхронной машины при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$ можно лишь за счет изменения внешнего момента $M_{\text{в}}$, приложенного к валу машины. При $M_{\text{в}} = 0$ ротор вращается со скоростью поля ($\Omega = \Omega_1$, $s = 0$) и машина не совершает полезной работы. При воздействии на вал ротора внешнего момента $M_{\text{в}}$, направленного против направления вращения поля, скорость ротора уменьшается до тех пор, пока не появится электромагнитный момент $M = f(s)$, который уравновесит момент $M_{\text{в}}$. Машина переходит в режим двигателя $s = (\Omega_1 - \Omega)/\Omega_1 > 0$. Наоборот, при воздействии внешнего момента $M_{\text{в}}$ направленного

по вращению поля, скорость ротора делается большей, чем скорость поля ($\Omega > \Omega_1$), и машина переходит в режим генератора ($s = (\Omega_1 - \Omega)/\Omega_1 < 0$).

Наконец, в режим тормоза можно перейти из режима двигателя, изменяя внешний момент M_b таким образом, чтобы ротор сначала остановился, а затем пришел во вращение в противоположную сторону (по отношению к полю).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Перечислите характерные точки на механической характеристике асинхронной машины.
2. В каких режимах может работать асинхронная машина?
3. Перечислите основные особенности различных режимов работы асинхронных машин.
4. Что такое пусковой режим АД и какими параметрами он характеризуется?
5. Что такое перегрузочная способность асинхронных электродвигателей?
6. Опишите двигательный режим работы АД.
7. Как перевести АД в генераторный режим работы?
8. Опишите тормозной режим работы асинхронной машины и его основные параметры.
9. Чем различаются режимы идеального и реального холостого хода асинхронной машины?
10. Перечислите особенности поведения АД в режиме короткого замыкания.
11. Как можно изменить режим работы асинхронной машины?

Глава 3

ОСНОВЫ РАСЧЕТА И КОНСТРУИРОВАНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Общие положения

Требования, предъявляемые к электрическим машинам, очень разнообразны. Их можно разбить на два вида – технические и экономические. Технические требования заключаются в том, что машина должна надежно работать в условиях, для которых она предназначена в течении заданного срока, обеспечивая при этом номинальные параметры при номинальном режиме работы. При этом она должна быть безопасной и удобной в эксплуатации. Экономические требования распространяются не только на сферы производства и эксплуатации, но и на сферу проектирования машины.

Экономичность на стадии **проектирования** заключается в снижении трудозатрат на расчеты. Это достигается применением современных систем автоматизированного проектирования (САПР), использования новейших методик расчета и высокой квалификацией проектанта. На этой стадии осуществляется экономическая оценка выбора конструкции АД, активных и конструктивных материалов, технология изготовления, а также эксплуатационных расходов.

Экономичность производства заключается в снижении себестоимости АД в процессе изготовления. Это достигается тщательной проработкой конструкции и технологии каждой детали и узла машины; снижением трудовых затрат путем применения современного высокопроизводительного оборудования и повышением коэффициента его использования (например, автоматизированные линии по изготовлению валов, подшипниковых щитов, станин при серийном производстве; применением станков, использующие компьютерную технику и т.д.); экономией материалов; внедрением безотходной или малоотходной технологии и т.п.

Экономичность в эксплуатации определяется:

- энергетическими показателями (КПД и cosφ), влияющих на оплату непроизводительных расходов электроэнергии;
- снижением затрат на плановые ремонты;
- уменьшением затрат на оплату обслуживающего персонала;
- применением автоматических систем управления (АСУ);
- культурой обслуживания и эксплуатации.

Следует отметить диалектическое противоречие между затратами производства и эксплуатации. Это противоречие разрешается соответствующими стандартами или требованиями заказчиками. Например, существующие стандарты на серийные электрические машины устанавливают требования, основанные на минимуме суммарных затрат в производстве и эксплуатации.

Из перечисленных выше основных требований следует, что основание для их выполнения закладывается при проектировании. В этой связи инженер-проектировщик должен обладать глубокими знаниями теории АД, знать последние достижения в областях теории проектирования, конструирования, материаловедения и технологии материалов; уметь пользоваться современными методиками расчёта с применением САПР, иметь навыки по анализу результатов расчётов и оформления конструкторской документации.

Расчет электрической машины – это сложная, многовариантная задача. При одних и тех же исходных данных можно получить целый ряд вариантов машины с различной геометрией, обмоточными данными, электромагнитными нагрузками и выходными характеристиками, которые в пределах допустимых отклонений удовлетворяют требованиям технического задания. Это связано с тем, что число уравнений для расчета электрической машины значительно меньше числа неизвестных величин, которые подлежит определить. Поэтому на первых этапах расчета целым рядом величин приходится произвольно задаваться. В дальнейшем, по мере расчета, необходимо проверить точность выбранных величин и, при необходимости, производить соответствующий перерасчет. Таким образом, расчет электрических машин производят, в сущности, методом итерации, то есть методом последовательных приближений. Для

того, чтобы численные значения выбираемых величин были максимально приближены к наиболее оптимальным, используют рекомендации, полученные на основе опыта проектирования и анализа известных машин такого же типа.

Существует несколько подходов к расчету электрических машин. Описанная ниже методика расчета асинхронных двигателей основана, как и подавляющее большинство известных расчетных методик общепромышленных электрических машин, на использовании машинной постоянной Арнольда C_A [1 – 4]:

$$C_A = \frac{D^2 \cdot l}{P'/n} = \frac{1}{\pi^2 \cdot k_{\text{в}} \cdot k_o \cdot \alpha_1 \cdot A \cdot B_\delta},$$

где D и l – главные размеры машины, соответственно, внутренний диаметр и расчетная длина сердечника статора; P' – расчетная мощность; n – синхронная частота вращения в об/с; $k_{\text{в}}$ – коэффициент формы кривой поля; k_o – обмоточный коэффициент; A – линейная токовая нагрузка; B_δ – индукция в воздушном зазоре; α_1 – расчетный коэффициент полюсного перекрытия.

Так как произведение $D^2 \cdot l$ пропорционально активному внутреннему объему машины, который однозначно определяет габарит в целом, то машинная постоянная позволяет определить тот минимальный объем машины, при котором можно выполнить требования технического задания. При этом параметры, входящие в правую часть этого уравнения, представляют собой относительные величины, которые для различных машин изменяются в достаточно узких диапазонах и поэтому могут быть на первом этапе проектирования достаточно точно выбраны по исходному техническому заданию.

3.2. Выбор базовой модели асинхронных двигателей и основных электротехнических материалов

Проектирование асинхронных двигателей (АД) начинается с выбора базовой конструктивной модели, которая берется за основу при выполнении всех расчетов и конструировании двигателей.

Если в исходных требованиях задания нет специальных указаний, то в качестве базовой модели следует выбирать основные конструктивные исполнения трехфазных машин единых серий, например, 4А или АИ.

Кроме того, при проектировании машины необходимо учесть три базовых фактора: степень защиты, способ охлаждения и способ монтажа. Они обычно оговорены в исходном техническом задании. Если такие требования однозначно не указаны, то их следует выбрать или из заданных условий применения оборудования, для которого проектируется двигатель, или по общим рекомендациям, приведенным в соответствующей технической литературе.

Перед началом расчета для проектируемого АД необходимо произвести выбор основных используемых материалов, которые разделяются на активные и электроизоляционные. Активные материалы служат для обеспечения оптимальных условий для протекания в машине электромагнитных процессов и делятся на магнитные и проводниковые. Электроизоляционные материалы служат для изоляции токоведущих частей.

А. Магнитные материалы. Для магнитопроводов низковольтных АД следует применять холоднокатаную изотропную электротехническую сталь. Различные марки этой стали отличаются друг от друга степенью легирования кремнием. Для АД мощностью до $15\div20$ кВт целесообразно выбирать нелегированную сталь, а для машин большой мощности – слаболегированную. Рекомендуемые марки стали в зависимости от высоты оси вращения h приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Рекомендуемые марки холоднокатаной электротехнической стали для магнитопроводов АД

h , мм	Марки стали	Коэффициент заполнения пакета сталью		
		статор	к.з. ротор	фаз. ротор
50...250	2013	0,97	0,97	0,95
280...355	2312 и 1312	0,95	0,97	0,95
400...560	2411	0,95	0,97	0,95

Б. Проводниковые материалы. Обмоточные провода выпускаются круглого и прямоугольного сечения. В АД общего назначения на напряжение до 1000 В применяются в основном провода с эмалевой изоляцией. Для АД с мощностью до 100 кВт ($h \leq 250$ мм) применяют провода круглого сечения диаметром от 0,29 до 1,62 мм, а при мощности свыше 100 кВт – провода прямоугольного сечения. Марки наиболее широко используемых обмоточных проводов приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Рекомендуемые марки обмоточных проводов

Марка провода	Класс нагревостойкости изоляции, допустимый нагрев	Характеристика провода	Условия применения
ПЭТВ	B, 130°C	Круглый, с пониженной стойкостью к тепловым ударам	Только для ручной укладки
ПЭТ-155	F, 155°C	Круглый, с большой стойкостью к тепловым ударам	В основном при механизированном способе укладки
ПЭТВМ	B, 130°C	Круглый, с повышенной механической прочностью	
ПЭТВМ-155	F, 155°C	Круглый, с повышенной механической прочностью	
ПЭТВП	B, 130°C	Прямоугольный	
ПЭТП	F, 155°C	Прямоугольный	

В. Электроизоляционные материалы. В систему изоляции АД входят пазовая, междуфазная и витковая изоляция обмотки статора и фазного ротора, изоляции выводных концов и внутренних соединений. Срок службы машины определяется в первую очередь

сроком службы изоляции, а толщина пазовой и междупитковой изоляции в значительной степени влияет на массогабаритные показатели машины. Выбранный класс нагревостойкости в значительной степени определяет уровень допустимых электромагнитных нагрузок. Конструкция системы изоляции выбирается в зависимости от высоты оси вращения и способа укладки обмотки по рекомендациям, приведенным в [1-4]. Для АД общего назначения следует выбрать класс нагревостойкости B при $h = 50\ldots 132$ мм и F при $h = 100\ldots 135$ мм, допускающие нагрев машин соответственно до 130°C и 155°C .

3.3. Электромагнитный расчет

Электромагнитный расчет включает в себя следующие два этапа – поисковый расчет и поверочный расчет.

В процессе *поискового расчета* определяются геометрические размеры и обмоточные данные активных частей машины: производится выбор главных размеров, расчет статора, выбор воздушного зазора и расчет ротора.

Поверочный расчет выполняется для оценки выходных характеристик спроектированной машины: производится расчет магнитной цепи и оценивается степень насыщения магнитопроводов, определяются параметры схемы замещения, выполняется расчет рабочих и пусковых характеристик и полученные результаты сравниваются с заданными в исходном задании параметрами.

3.3.1. Поисковый расчет

А. Выбор главных размеров. Главными размерами АД являются внутренний диаметр пакета статора D и его расчетная длина l . В общем случае выбор главных размеров начинается с выбора высоты оси вращения h по заданным P_2 и n . По h определяется наружный диаметр статора D_1 , а затем D . После этого, используя известное выражение для машинной постоянной,

связывающее потребляемую мощность и частоту вращения с главными размерами и электромагнитными нагрузками (магнитной индукцией в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузкой A), вычисляют l . При этом выбранное значение A необходимо привести в соответствие с выбранным ранее классом нагревостойкости путем умножения на коэффициент k_A , значения которого приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Значение поправочного коэффициента k_A

h , мм	Рекомендуемый класс изоляции	Значения k_A при классе нагревостойкости		
		B	F	H
50...132	B	1,0	1,15	1,32
160...355	F	0,87	1,0	1,15

Критерием правильности определения D и l служат отношения $\lambda = l/\tau$ или $\lambda = l/D$.

Обозначения геометрических размеров показаны на рис. 3.1.

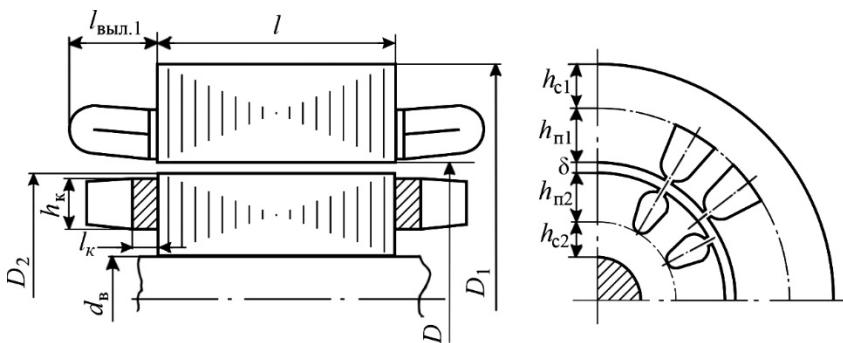


Рис. 3.1. Активные части электродвигателя

1. Так как ряд высот оси вращения h стандартизован, то расчет диаметральных размеров машины и, в частности, наружный диаметр статора D_1 необходимо увязать со значением h .

В практике современного электромашиностроения наблюдается тенденция максимального снижения высоты оси вращения электродвигателей h при заданных мощности P_2 , частоте вращения n . Основной причиной этого являются большие удобства потребителей при соединении электродвигателей с приводимыми механизмами, имеющими меньшие габариты, чем электродвигатели, а также при встраивании электродвигателей в станки и другие механизмы. Снижение высоты оси вращения уменьшает механическую инерционность роторов и, следовательно, улучшает динамические свойства двигателей.

Снижение h при заданных значениях P_2 и n увеличивает, как это следует из машинной постоянной, длину машины. Поэтому при заданной высоте оси вращения h надо проектировать машины с наибольшим допустимым наружным диаметром корпуса $D_{\text{корп}}$, обеспечивающим минимально допустимое расстояние от нижней части корпуса машины до опорной плоскости лап.

В инженерных расчетах наружный диаметр статора D_1 можно определить по соотношению:

$$D_1 = 2h(1 - k_h), \quad (3.1)$$

где коэффициент $k_h = 1 - D_1/2h$ определяется по табл. 3.4.

Таблица 3.4

Значение коэффициента k_h

h , мм	59...90	100...160	180...280	315...355
k_h	0,18	0,15	0,13	0,065

Здесь и далее во всех формулах линейные размеры необходимо подставлять в мм.

2. Внутренний диаметр статора D :

$$D = k_D D_1, \quad (3.2)$$

где $k_D = D/D_1$ – конструктивный коэффициент (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Значение конструктивного коэффициента k_D

$2p$	2	4	6, 8
k_D	0,52...0,59	0,59...0,66	0,64...0,76

3. Синхронная частота вращения, выраженная в об/с:

$$n = f / p. \quad (3.3)$$

4. Полюсное деление:

$$\tau = \pi D / 2p. \quad (3.4)$$

5. У машин переменного тока расчетная (электромагнитная) мощность, которая входит в формулу машинной постоянной C_A (см. §3.1), равна:

$$P' = m_1 E_1 I_1,$$

где m_1 – число фаз обмотки статора; E_1 – ЭДС фазы обмотки статора; I_1 – ток фазы обмотки статора.

Под электромагнитной мощностью понимают внутреннюю мощность, которая посредством электромагнитного поля передаётся через воздушный зазор на ротор.

На первом этапе расчета величину E_1 определим по выражению:

$$E_1 = k_E U_h,$$

где k_E – коэффициент падения напряжения на первичной обмотке, который приближенно можно вычислить по выражению:

$$k_E = 0,98 - p / 200. \quad (3.5)$$

6. Расчетная мощность:

$$P' = \frac{k_E P_2}{\eta \cos \varphi}. \quad (3.6)$$

Если значения КПД η и коэффициента мощности $\cos\varphi$ однозначно в исходном задании не оговорены, то их можно выбрать по рис. 3.2.

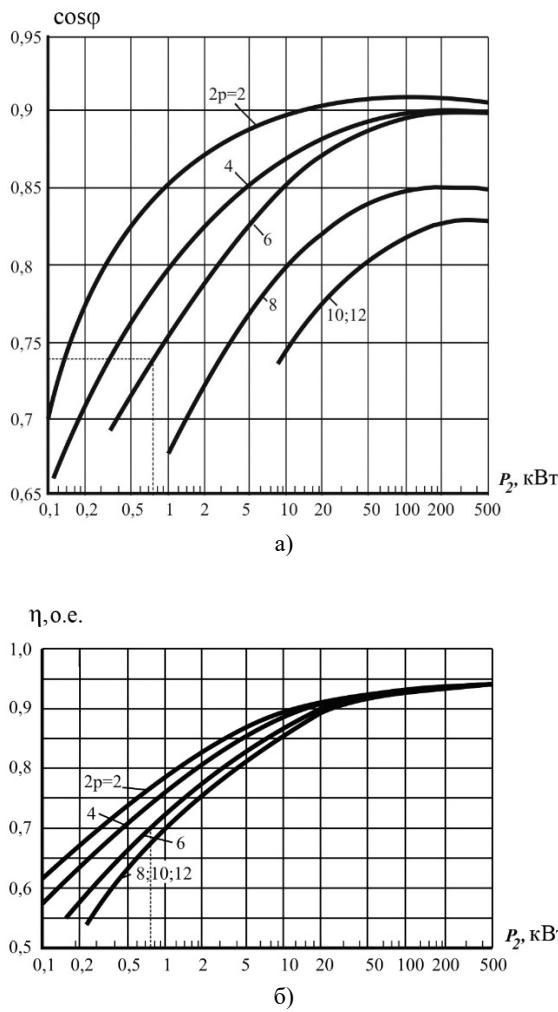


Рис. 3.2. Средние значения энергетических показателей асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором с исполнением по защите IP44, способу охлаждения IC0141:

а) КПД; б) $\cos\varphi$

7. Индукция в воздушном зазоре. При $D \leq 225$ мм индукцию B_δ можно приблизительно выбрать с учетом выражения:

$$B_\delta = B + D_1/1800,$$

где $B = 0,75$ для $2p = 4, 6, 8$; $B = 0,62$ для $2p = 2$.

При $D = 250\dots500$ мм индукцию B_δ можно по табл. 3.6.

Таблица 3.6

Значение индукции B_δ в зависимости от числа полюсов

$2p$	2	4	6, 8
B_δ , Тл	0,74\dots0,76	0,76\dots0,78	0,74\dots0,81

8. Линейная нагрузка приблизительно выбирается по выражениям:

$$\begin{aligned} A &= 0,1D_1 + (5\dots10) \text{ для } D_1 \leq 300 \text{ мм;} \\ A &= 0,1D_1 \pm (1\dots5) \text{ для } D_1 = 310\dots420 \text{ мм;} \\ &\quad (\langle+\rangle - \text{при } 2p = 2; \langle-\rangle - \text{при } 2p \geq 4). \end{aligned}$$

Следует отметить, что предложенные рекомендации по выбору индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки A , основаны на усредненных данных серийных машин, поэтому выбранные значения B_δ и A являются приблизительными и их можно в каждом конкретном случае при необходимости откорректировать, например, в соответствие со значениями, принятыми в серийных машинах аналогичного типоразмера, приведенными в [5].

9. Коэффициент формы кривой поля $k_b = B_{\text{зф}}/B_{\text{ср}}$ принимают в зависимости от степени насыщения зубцов $k_z = (F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) / F_\delta$ по табл. 3.7. Степень насыщения зубцов может быть найдена лишь на этапе расчета магнитной цепи. На начальном этапе можно задаться ожидаемым значением k_z . Так, для общепромышленных машин величина коэффициента насыщения обычно выбирается в пределах $k_z = 1,1\dots1,25$.

Таблица 3.7

Значение коэффициентов формы кривой поля $k_{\text{в}}$, насыщения зубцов k_z и полюсного перекрытия α_1

k_z	1	1,1	1,25	1,5	1,75	2
$k_{\text{в}}$	1,11	1,1	1,09	1,08	1,07	1,06
α_1	0,637	0,66	0,71	0,74	0,77	0,78

В дальнейшем после расчета магнитной цепи (п.56) значение k_z может быть скорректировано.

10. Предварительное значение обмоточного коэффициента k_o выбирают в зависимости от типа обмотки статора: для однослойной обмотки, которая применяется при $h = 50 \dots 160$ мм ($P_{2n} < 12 \dots 15$ кВт), обмоточный коэффициент принимаем предварительно $k_o = 0,96$. Для двухслойной обмотки, которая применяется при $h = 180 \dots 250$ мм принимаем $k_o = 0,92$. Отметим, что в этих машинных применяются всыпные обмотки из эмалированного провода круглого сечения. При $h > 280$ мм используются обмотки из прямоугольного провода.

11. Расчетная длина сердечника статора, мм:

$$l = \frac{10^6 P'}{\pi^2 k_{\text{в}} k_o \alpha_1 \cdot AB_\delta D^2 n}. \quad (3.7)$$

Полученное значение l округляют до целого числа.

Из (3.6) и (3.7) видно, что при заданных мощности P_2 и частоте вращения n длина сердечника статора l и, соответственно, объем сердечника машины, зависит в основном от электромагнитных нагрузок (индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки A). Чем больше A и B_δ , тем меньше l и выше использование активных материалов в машине. Однако увеличение электромагнитных нагрузок, сопровождающее повышением температуры активных частей машины, ограничивается классом нагревостойкости изоляции. При выборе электромагнитных нагрузок следует также учитывать, что отношение A / B_δ должно быть в определен-

ных пределах, так как их значение влияет на технико-экономические показатели машин переменного тока – КПД, сопр., пусковые характеристики и массу.

При $l < 250$ мм действительная длина сердечника равна расчетной $l_1 = l$, так как в машине не выполняют радиальных каналов. При $l > 250$ мм сердечник выполняют в виде отдельных пакетов длиной $l_{\text{пак}} = 80 \dots 100$ мм, разделенных между собой радиальными вентиляционными каналами шириной $b_k = 10$ мм.

12. Оптимальность выбранных главных размеров оценивают по значению конструктивного фактора $\lambda = l/\tau$, которое должно находиться в следующих пределах: $\lambda = 0,7 \dots 2,2$ для $2p = 4 \dots 8$ и $\lambda = 0,5 \dots 1,7$ для $2p = 2$.

Б. Расчет статора проводится в следующей последовательности:

- задаются величиной числа пазов на полюс и фазу q и определяют число пазов статора Z_1 ;
- вычислив номинальный ток фазы статора I_{1n} , определяют число эффективных проводов в пазу N_p и число витков в фазе обмотки W_1 ;
- выбрав допустимые величины индукции на участках магнитопровода статора, вычисляют размеры зубцов и пазов.

При этом необходимо учесть, что провода круглого сечения укладывают в трапециoidalные пазы, которые обеспечивают зубцу параллельные стенки и постоянное сечение по всей высоте, а для проводов прямоугольного сечения необходимо выбрать прямоугольные полуоткрытые или открытые пазы. Диаметр круглого проводника d_{iz} обмотки статора (эффективное сечение) определяется по выбранному допустимому коэффициенту заполнения паза k_3 в зависимости от выбранного способа укладки (если способ укладки не оговорен в задании, то его выбирают произвольно). В том случае, если рассчитанное значение d_{iz} получилось больше 1,76мм (при выбранной ручной укладке) или больше 1,4 мм (при выбранной машинной укладке), то для облегчения процесса укладки необходимо эффективный проводник выполнить из нескольких элементарных проводников. Их количество n_{el}

выбирается таким, чтобы суммарная площадь сечения элементарных проводников ($n_{эл} \cdot q_{эл}$) была не меньше расчетного эффективного сечения проводника.

При расчете проводника прямоугольного сечения его ширина определяется по ширине паза b_n . Определив по допустимой плотности тока J_1 в обмотке статора и по току I_{1n} необходимое сечение провода, выбирают ближайший стандартный провод. При этом сечение провода не должно превышать 18 мм², а размер провода по высоте должен быть не более 2,5 мм. Если по расчету требуется большее сечение, то проводник следует составить из нескольких элементарных. После выбора стандартного проводника уточняют размеры паза.

Обмотка и пазы статора. При $h \leq 160$ мм принимается однослочная обмотка, при $h = 180 \dots 250$ мм – однодвухслойная или двухслойная высыпная обмотка и полузакрытый трапецеидальный паз (см. рис. 3.3), при $h = 280 \dots 355$ мм – двухслойная обмотка из жестких полукатушек и полуоткрытый паз.

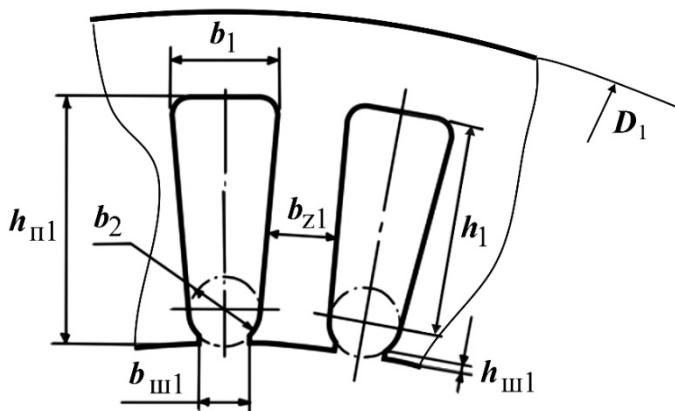


Рис. 3.3. Зубцово-пазовая зона статора

Для выбора числа пазов принимаем число пазов на полюс и фазу q по табл. 3.8:

Таблица 3.8

Рекомендуемые числа пазов на полюс и фазу

h, мм	Число q			
	2p = 2	2p = 4	2p = 6	2p = 8
50...71	4	2	2; 3	1,5; 2
80...132	4	2; 3	2; 3	1,5; 2
160...255	5; 6	3; 4	3; 4	2; 3
250...355	7; 8	4; 5	3; 4	3; 4

13. Число пазов:

$$Z_1 = 2pmq. \quad (3.8)$$

14. Шаг обмоток по пазам:

$$y = \beta \frac{Z_1}{2p}, \quad (3.9)$$

где β – относительное укорочение шага обмотки: для однослойной обмотки $\beta = 1$ (т.е. шаг диаметральный $y = \tau$); для двухслойной обмотки $\beta = 0,58...0,63$ при $2p = 2$ и $\beta = 0,8...0,85$ при $2p \geq 4$.

Шаг необходимо округлить до целого числа, после чего следует уточнить укорочение шага:

$$\beta = y \frac{2p}{Z_1}. \quad (3.10)$$

15. Коэффициент укорочения:

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \beta. \quad (3.11)$$

16. Коэффициент распределения:

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}, \quad (3.12)$$

где $\alpha = \frac{\pi}{mq}$ – угол фазной зоны обмотки.

17. Обмоточный коэффициент:

$$k_o = k_y k_p. \quad (3.13)$$

18. Номинальный ток фазы статора:

$$I_{1H} = \frac{P_{2H}}{m_1 U_1 \cos \varphi}. \quad (3.14)$$

19. Число эффективных проводников в пазу:

$$N_n = \frac{\pi \cdot D A a_1}{I_{1H} Z_1}, \quad (3.15)$$

где a_1 – число параллельных ветвей в обмотке одной фазы.

Число N_n должно быть целым, а для двухслойной обмотки, кроме того, четным числом. В зависимости от способа соединения катушечных групп можно получить $2p \geq a_1 \geq 1$, причем $2p$ должно без остатка делиться на a_1 .

В АД с $h \leq 132$ мм обычно $a_1 = 1$.

20. Число витков в фазе обмотки статора:

$$W_1 = \frac{N_n Z_1}{2 a_1 m}. \quad (3.16)$$

21. Магнитный поток:

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4 k_b k_o W_1 f}. \quad (3.17)$$

22. Индукция в зазоре

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot 10^6}{a_1 \cdot \tau \cdot l}. \quad (3.18)$$

Значение индукции B_δ не должно сильно отличаться от выбранного в п. 7.

23. Линейная нагрузка:

$$A = \frac{2 \cdot I_{\text{lin}} W_1 m_1}{\pi D}. \quad (3.19)$$

Значение A не должно сильно отличаться от выбранного в п. 8.

24. Магнитопровод статора надо спроектировать так, чтобы он не насыщался. Для этого принимаем предварительно допустимые индукции в зубцах и спинке статора по табл. 3.9.

Таблица 3.9

**Допустимые значения индукции
на различных участках магнитной цепи**

$2p$	B_{z1} , Тл	B_{c1} , Тл	B_{z2} , Тл	B_{c2} , Тл
2	1,75...1,95	1,50...1,65	1,75...1,95	1,35...1,45
4	1,75...1,95	1,50...1,65	1,75...1,95	1,15...1,25
6	1,70...1,95	1,45...1,60	1,75...1,95	0,95...1,15
8	1,70...1,90	1,20...1,35	1,70...1,90	0,75...0,85

25. Зубцовое деление статора:

$$t_1 = \pi D / Z_1. \quad (3.20)$$

26. Ширина зубца статора:

$$b_{z1} = \frac{B_{\delta} t_1 l}{B_{z1} l_1 k_c}. \quad (3.21)$$

Коэффициент заполнения пакета сталью k_c принимается 0,97 для оксидированных (при $h \leq 250$ мм) и 0,95 для лакированных (при $h \geq 280$ мм) листов толщиной 0,5 мм.

27. Высота спинки статора:

$$h_{cl} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2 B_{cl} l_1 k_c}. \quad (3.22)$$

28. Размеры паза статора в штампе:

$$\begin{aligned} h_{nl} &= (D_1 - D)/2 - h_c; \\ b_1 &= \pi(D + 2h_{nl})/Z_1 - b_{z1}; \\ b_2 &= \frac{\pi(D + 2h_{nl}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi}; \\ h_1 &= h_{nl} - h_{nl} - b_2/2. \end{aligned} \quad (3.23)$$

Высоту шлица h_{sh1} принимают $h_{sh1} = 0,5$ мм при $h \leq 132$ мм, $h_{sh1} = 1,0$ мм при $h \geq 160$ мм. Ширина шлица b_{sh1} должна обеспечить возможность укладки проводников обмотки статора в паз. В сериях АД величина b_{sh1} нормализуется и выбирается по табл. 3.10.

Таблица 3.10

Среднее значение ширины шлица полуузакрытого паза статора

h , мм	b_{sh1} , мм при $2p$			
	2	4	6	8
50...63	1,8	1,8	1,8	1,8
71	2,0	2,0	2,0	2,0
80, 90	3,0	3,0	2,5	2,7
100, 112	3,5	3,5	3,0	3,0
132	4,0	3,5	3,5	3,5

29. Размеры паза в свету:

$$b'_1 = b_1 - \Delta_c; \quad b'_2 = b_2 - \Delta_c; \quad h'_{nl} = h_{nl} - \Delta_c, \quad (3.24)$$

где Δ_c – припуск на сборку: $\Delta_c = 0,1$ мм при $h \leq 132$ мм; $\Delta_c = 0,2$ мм при $h = 160\dots 250$ мм; $\Delta_c = 0,3$ мм при $h = 280\dots 355$ мм.

30. Площадь паза в свету:

$$S_{nl} = 0,5(b'_1 + b'_2)h_1. \quad (3.25)$$

31. Площадь изоляции:

$$S_{из} = b_{из1} (2h'_{п} + b'_{l} + 0,5\pi b'_{2} - b_{из1}) + b_{из2} 0,5b'_{2}, \quad (3.26)$$

где $b_{из1}/b_{из2}$ – односторонняя толщина изоляции в пазу.

Для класса изоляции B применяют лавсановую пленку ПЭТФ, для F и H – имидофлекс. Толщину изоляции принимают по рекомендациям, приведенным в табл. 3.11.

32. Площадь изолированного паза:

$$S_{ни} = S_{п} - S_{из}. \quad (3.27)$$

Таблица 3. 11

Значения односторонней толщины изоляции в пазу

h , мм	50...80	90...132	160...250
$b_{из1}/b_{из2}$, мм	0,2/0,3	0,25/0,35	0,4/0,5

33. Диаметр проводника определяется из допустимого коэффициента заполнения паза $k_3 \leq 0,72$ для машинной укладки и $k_3 \leq 0,75$ для ручной:

$$d_{из} = \sqrt{\frac{k_3 S_{ни}}{N_{п} n_{эл}}} . \quad (3.28)$$

После этого выбирают марку провода и по ГОСТу выбирают ближайшие стандартные диаметры $d_{из}/d$ и площадь проводника $q_{пр}$.

Плотность тока

$$J_1 = I_{1H} / (a_l \cdot n_{эл} \cdot q_{пр}) . \quad (3.29)$$

Величину J_1 сравнивают с рекомендуемым значением $J_{1\text{доп}}$ по рис. 3.4 и при необходимости корректируют размеры провода.

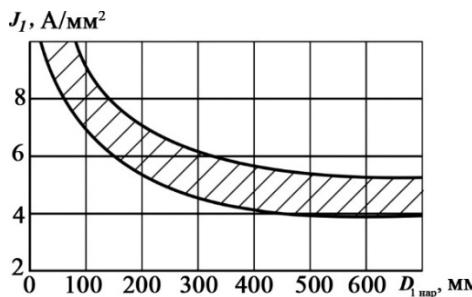


Рис. 3.4. Рекомендуемые значения плотности тока в обмотке статора J_1

В. Воздушный зазор. Величина воздушного зазора δ в значительной степени определяет энергетические показатели машины. Уменьшение δ приводит к уменьшению намагничивающего тока I_μ , уменьшению потерь в меди и увеличению $\cos\varphi$. Однако чрезмерное уменьшение δ приводит к резкому увеличению амплитуды пульсации индукции в воздушном зазоре B_δ , что обуславливает увеличение поверхностных и пульсационных потерь и уменьшает КПД машины. Поэтому выбор δ производится из расчета обеспечения минимума суммарных потерь, ориентируясь на заводские исполнения аналогичных по типу и мощности асинхронные двигатели новых серий.

Величина δ зависит в основном от диаметра расточки статора D и длины вала $L_{\text{в.п}}$ между подшипниками. Так как величина D определяется допусками на размеры (чем больше D , тем больше допуск), а величина $L_{\text{в.п}}$ определяется величиной l , которая, в свою очередь, также зависит от D , то величина δ увеличивается с увеличением D . Поэтому выбор δ производится в зависимости от величины D .

34. Величина воздушного зазора δ определяется по следующим эмпирическим формулам:

$$\delta \approx 0,0028 \cdot D_1 \text{ для } 2p = 2;$$

$$\delta \approx 0,0024 \cdot D_1 \text{ для } 2p = 4;$$

$$\delta \approx 0,0020 \cdot D_1 \text{ для } 2p = 6,8.$$

При этом зазор δ должен быть кратен 5, минимальная величина 0,20 мм.

Г. Расчет ротора. В АД применяются роторы двух типов. Расчет к.з. ротора в общем случае выполняется следующим образом: выбирают число пазов ротора Z_2 в соответствии с числом Z_1 , т.е. исходя из допустимых соотношений между ними. Затем, с учетом требований задания к выходным характеристикам, выбирается форма паза и рассчитываются размеры зубцов, ярма и паза. Определив поперечное сечение паза и величину тока в стержне, оценивают плотность тока в стержне обмотки ротора, которая не должна превышать допустимых значений. После этого определяют размеры к.з. кольца.

При расчете фазного ротора необходимо принять во внимание, что при $h=160\ldots220$ мм его обмотка выполняется двухслойной петлевой из провода круглого сечения. Пазы при этом выполняются полузакрытymi трапецидальными. В АД при $h = 225\ldots335$ мм обмотка ротора двухслойная волновая из провода прямоугольного сечения. Расчет обмотки и зубцово-пазовой зоны фазного ротора производится аналогично расчету статора, при этом число витков в фазе обмотки должно быть таким, чтобы напряжение на контактных кольцах двигателя не превышало допустимых значений.

35. Внешний диаметр ротора:

$$D_2 = D - 2\delta. \quad (3.30)$$

36. Длина ротора $l_2 = l_1$.

37. Форма и число пазов ротора. При $h \leq 355$ мм обмотка ротора литая алюминиевая. Одновременно со стержнями отливаются короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопатки.

Выбор формы пазов короткозамкнутого ротора зависит от полезной мощности P_2 , числа пазов Z_1 , числа полюсов $2p$ и требуемых пусковых характеристик. В АД применяются следующие формы пазов:

- при $h \leq 132$ мм – овальные полузакрытые;
- при $h = 160\ldots250$ мм – овальные закрытые (кроме $h = 250$ мм и $2p = 2$);
- при $h = 250\ldots355$ мм и $2p = 2$ – бутылочные закрытые;

– при $h = 280 \dots 355$ мм и $2p \geq 4$ – овальные закрытые с уменьшенным сечением в верхней части (для улучшения пусковых характеристик за счет усиления эффекта вытеснения тока в стержнях ротора).

Размеры шлицевой части овальных полузакрытых пазов (рис. 3.5) при $h \leq 100$ мм выбирают равными $h_{\text{ш}2} = 0,5$ мм и $b_{\text{ш}2} = 1,0$ мм; при $h = 112 \dots 132$ мм выбирают $h_{\text{ш}2} = 0,75$ мм и $b_{\text{ш}2} = 1,5$ мм.

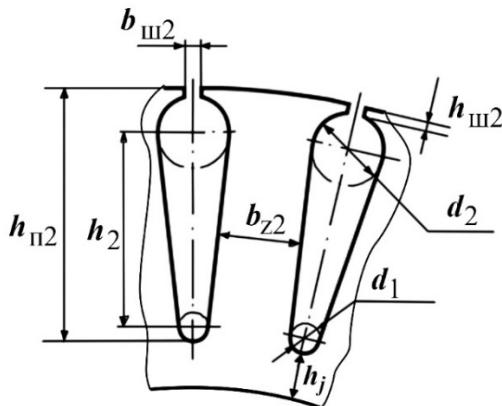


Рис. 3.5. Зубцово-пазовая зона ротора

Число пазов ротора выбираем по табл. 3.12. Для уменьшения паразитных моментов в машинах с $h \leq 160$ мм выполняют скос пазов роторов на одно зубцовое деление статора $t_{\text{ск}} = t_1$.

Таблица 3.12

**Рекомендуемые числа пазов статора и ротора
для асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором**

h , мм	Z_1/Z_2 при $2p$			
	2	4	6	8
50...63	24/19	24/18	36/28	–
71	24/19	24/18	36/28	36/28
80...100	24/19	36/28	36/28	36/28
112...132	24/19	36/34	54/51	48/44

Размеры паза ротора вычисляют исходя из допустимых индукций в зубце и в спинке, а также из условия получения постоянной ширины зубца по всей его высоте. Допустимые индукции в зубцах B_{z2} и спинке B_{c2} ротора выбирают по табл. 3.9.

38. Зубцовое деление ротора:

$$t_2 = \pi D_2 / Z_2 . \quad (3.31)$$

39. Сердечник ротора насаживается непосредственно на вал, поэтому его внутренний диаметр равен наружному диаметру вала:

$$d_{\text{в}} = k_{\text{в}} D_1 , \quad (3.32)$$

где $k_{\text{в}} = 0,19$ для $h = 50 \dots 63$ мм и $k_{\text{в}} = 0,23$ для $h = 71 \dots 355$ мм.

Значение $d_{\text{в}}$ сравниваем с рекомендуемыми размерами вала d_3 по табл. 3.21.

40. Ток в стержне ротора:

$$I_2 = k_I I_1 \frac{2m_l W_l k_o}{Z_2} , \quad (3.33)$$

где $k_I = I_2 / I_1 = \cos \varphi + 0,04$, но не более 0,99.

41. Ширина зубца ротора при допустимой индукции:

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l}{B_{z2} l_2 k_c} . \quad (3.34)$$

42. Расчетная высота спинки ротора:

$$h_{c2p} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2l_2 k_c B_{c2}} . \quad (3.35)$$

43. Поскольку часть потока может замыкаться по валу, то величину спинки статора можно уменьшить путем увеличения высоты паза, приняв расчетный диаметр вала равным $d_{b,p} = k \cdot d_{\text{в}}$,

где $k = 0,6 \dots 1$ (меньшие значения выбираются при $2p = 2$). Тогда высота паза ротора равна:

$$h_{\text{п2}} = 0,5(D_2 - k \cdot d_{\text{в}}) - h_{\text{с2р}}. \quad (3.36)$$

44. Размеры шлицевой части паза ротора при овальных полузакрытых пазах можно принять равными $h_{\text{ш2}} = 0,5$ мм, $b_{\text{ш2}} = 1$ мм. Тогда размеры паза (см. рис. 3.4):

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{\pi(D_2 - 2h_{\text{п2}}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 - \pi}; \\ d_2 &= \frac{\pi(D_2 - 2h_{\text{ш2}}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 + \pi}; \\ h_2 &= h_{\text{п2}} - h_{\text{ш2}} - 0,5(d_2 + d_1). \end{aligned} \quad (3.37)$$

Для качественной заливки ротора, а также по условиям прочности штампа должно быть:

$$d_1 \geq 1,5 \dots 2 \text{ мм при } h \leq 132 \text{ мм и } d_1 \geq 3 \text{ мм при } h \geq 160 \text{ мм.}$$

45. Действительная высота спинки статора:

$$h_{\text{с2}} = 0,5(D_2 - d_{\text{в}}) - h_{\text{п2}}. \quad (3.38)$$

По условиям механической прочности должно быть $h_{\text{с2}} \geq 4$ мм.

46. Поперечное сечение стержня, равное площади паза ротора:

$$q_{\text{с}} = q_{\text{п2}} = \frac{\pi}{8}(d_2^2 + d_1^2) + 0,5(d_2 + d_1)h_1. \quad (3.39)$$

47. Плотность тока в стержне ротора:

$$J_{\text{с}} = I_2 / q_{\text{с}}. \quad (3.40)$$

Плотность тока J_c не должна превышать 2,5...4,0 А/мм² для машин закрытого обдуваемого исполнения IP44 и 3,0...4,0 А/мм² для машин защищенного исполнения IP23.

48. Коэффициент приведения тока кольца к току стержня:

$$\Delta = 2 \sin \pi p / Z_2 . \quad (3.41)$$

49. Ток короткозамыкающего кольца:

$$I_k = I_2 / \Delta . \quad (3.42)$$

50. Размеры короткозамыкающего кольца (сечение, высота, ширина):

$$q_k = I_k / J_k ; \quad h_k = (1,1 \dots 2,5) h_{\text{п2}} ; \quad l_k = q_k / h_k , \quad (3.43)$$

где допустимая плотность тока $J_k = 2,0 \dots 3,2$ А/мм².

Уточняем сечение кольца:

$$q_k = h_k l_k . \quad (3.44)$$

3.3.2. Поверочный расчет

A. Расчет магнитной цепи. Расчет магнитной цепи производится для определения тока намагничивания I_μ , необходимого для создания в машине магнитного потока Φ требуемой величины. Расчет магнитной цепи выполняется по амплитудным значениям индукций основной гармонической пространственного распределения магнитного поля. Учет уплощения магнитного поля проводится методом Пунга с использованием специально рассчитанной кривой намагничивания для зубцов. Пространственное распределение индукции в спинках учитывается с помощью специальной кривой намагничивания для них.

Расчет проводят в следующей последовательности. Сначала определяют индукцию B_i в отдельных участках магнитопровода. Затем по величине B_i определяют напряженность поля и падение магнитного потенциала F_i на каждом участке.

По величинам МДС вычисляются ток I_μ , коэффициент насыщения зубцовой зоны k_z и коэффициент насыщения всей магнитной цепи k_μ . Величина k_z и k_μ , а также относительное значение намагничивающего тока $I'_\mu = I_\mu / I_{1\mu}$ являются критериями оценки правильности выбора геометрии АД.

Магнитная цепь рассчитывается на один полюс для номинального напряжения.

51. Индукция в отдельных участках магнитной цепи:

$$\begin{aligned} B_{z1} &= \frac{B_\delta t_1 l}{b_{z1} l_1 k_c}; & B_{z2} &= \frac{B_\delta t_2 l}{b_{z2} l_2 k_c}; \\ B_{c1} &= \frac{\Phi \cdot 10^6}{2h_{c1} l_1 k_c}; & B_{c2} &= \frac{\Phi \cdot 10^6}{2h_{c2p} l_2 k_c}. \end{aligned} \quad (3.45)$$

52. Коэффициент воздушного зазора (Картера):

$$\begin{aligned} k_\delta &= k_{\delta1} k_{\delta2}; & k_{\delta1} &= \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta}; & k_{\delta2} &= \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \delta}; \\ \gamma_1 &= \frac{4}{\pi} \left(\frac{b_{m1}}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{b_{m1}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{m1}}{2\delta} \right)^2} \right); \\ \gamma_2 &= \frac{4}{\pi} \left(\frac{b_{m2}}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{b_{m2}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{m2}}{2\delta} \right)^2} \right). \end{aligned} \quad (3.46)$$

53. Намагничивающая сила воздушного зазора:

$$F_\delta = 10^{-3} \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta \cdot k_\delta, \quad (3.47)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха.

54. Напряженности поля определяем по таблицам намагничивания в зависимости от выбранной марки стали (например, в приложении приведены кривые намагничивания стали 2013, таблицы намагничивания для других марок сталей можно найти в [1–4]). Намагничающие силы магнитных участков:

– зубцы статора

$$F_{z1} = H_{z1} h_{z1}, \quad (3.48)$$

где $h_{z1} = h_{\text{п1}} - h_{\text{ш1}} - 0,1b_1$ – высота зубца статора;

– зубцы ротора

$$F_{z2} = H_{z2} h_{z2}, \quad (3.49)$$

где $h_{z2} = h_{\text{п2}} - h_{\text{ш2}} - 0,1(d_1 + d_2)$ – высота зубца ротора;

– спинка статора

$$F_{\text{c1}} = H_{\text{c1}} \frac{\pi(D_1 - h_{\text{c1}})}{4p}; \quad (3.50)$$

– спинка ротора

$$F_{\text{c2}} = H_{\text{c2}} \frac{\pi(d_{\text{в}} + h_{\text{c2}})}{4p}. \quad (3.51)$$

Намагничающая сила на один полюс:

$$F_{\Sigma} = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_{\text{c1}} + F_{\text{c2}}. \quad (3.52)$$

55. Намагничающий ток:

$$I_{\mu} = \frac{2pF_{\Sigma}}{0,9m_l W_l k_o}. \quad (3.53)$$

Значение намагничивающего тока в относительных единицах:

$$I_{\mu}^* = I_{\mu} / I_{lh}.$$

В АД мощностью не более 2...3 кВт допускается $I_{\mu}^* = 0,5...0,6$. В АД средней и большой мощности $I_{\mu}^* \leq 0,2$.

56. Коэффициенты насыщения:

$$k_z = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}}; \quad k_{\mu} = F_{\Sigma} / F_{\delta}, \quad (3.54)$$

где k_z и k_{μ} – коэффициенты насыщения зубцовой зоны и магнитной цепи.

Полученный коэффициент k_z необходимо сравнить с величиной, выбранной ранее в п. 9. Отличие не должно превышать 5%, в противном случае надо вернуться к началу расчета и скорректировать выбранное значение k_z .

Обычно коэффициент насыщения магнитной цепи $k_{\mu} = 1,2...1,45$.

Б. Расчет параметров Т-образной схемы замещения.

Параметрами асинхронной машины называют активные и индуктивные сопротивления обмоток статора r_1 , x_1 и ротора r_2 , x_2 , а также сопротивления намагничивающего контура r_m , x_m , входящие в эквивалентную электрическую схему замещения машины (рис. 3.6).

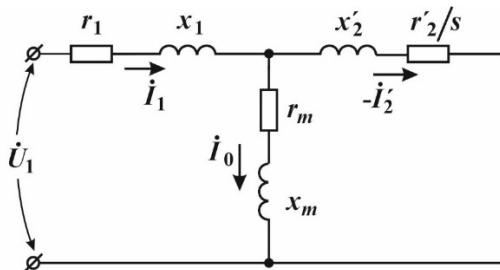


Рис. 3.6. Т-образная схема замещения АД

При изменении скольжения s ротора от скольжения холостого хода $s_{\text{хх}}$ до номинального скольжения $s_{\text{н}}$ значения параметров схемы замещения принимаются постоянными. Их величины определяются исходя из геометрических размеров, обмоточных данных и электрических свойств материала обмоток. Выразив параметры схемы замещения в относительных единицах, можно оценить правильность выбранных размерных соотношений и расчета обмоточных данных АД.

57. Активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$r_1 = \rho \frac{l_{\text{cp}} W_1 \cdot 10^{-3}}{q_{\text{пр}} n_{\text{эл}} a_1}, \quad (3.55)$$

где ρ – удельное сопротивление, величина которого равна при температурах 75 и 115°C соответственно – для меди 1/47 и 1/41 Ом·мм²/м; алюминия литого 1/24 и 1/22 Ом·мм²/м; роторов, заливших под давлением, 1/21,5 и 1/20,5 Ом·мм²/м; l_{cp} – средняя длина витка; $l_{\text{л}}$ – длина лобовой части обмотки:

$$l_{\text{cp}} = 2(l_1 + l_{\text{л}}); \quad l_{\text{л}} = 1,3\tau\beta, \quad (3.56)$$

где $\beta = y/\tau$ – относительное укорочение шага обмотки.

Длина вылета лобовой части:

$$l_{\text{выл.1}} = (0,19 + 0,1p)b_{\text{cp}} + 10, \quad (3.57)$$

где $b_{\text{cp}} = \frac{\pi(D + h_{\text{пл}})}{Z_1}y$.

58. Активное сопротивление алюминиевого стержня ротора:

$$r_c = \rho_{75} \frac{l_{\text{cp}} 10^{-3}}{q_c}. \quad (3.58)$$

59. Сопротивление короткозамыкающего кольца:

$$r_k = \rho_{75} \frac{\pi D_k 10^{-3}}{Z_2 q_k}, \quad (3.59)$$

где $D_k = D_2 - h_k$.

60. Сопротивление фазы ротора:

$$r_2 = r_c + 2 \cdot r_k / \Delta^2. \quad (3.60)$$

61. Приведенное к статору сопротивление фазы ротора:

$$r'_2 = r_2 \frac{4m_1 (W_1 k_o)^2}{Z_2 k_{ck}^2}. \quad (3.61)$$

Сопротивление стержня:

$$r'_c = r_c \frac{4m_1 (W_1 k_o)^2}{Z_2 k_{ck}^2}. \quad (3.62)$$

62. Коэффициент проводимости пазового рассеяния полуза-
крытого трапецидального паза статора:

$$\lambda_{nl} = 0,66 + \frac{2h_l}{3(b_1 + b_2)} + \frac{h_{ml}}{b_{ml}}. \quad (3.63)$$

Формулы для других пазов приведены в [1,2].

63. Коэффициенты проводимости лобового рассеяния ста-
тора для однослойной и двухслойной обмотки:

$$\lambda_{nl} = 0,34 \frac{q}{l_1} (l_n - 0,64\tau\beta). \quad (3.64)$$

64. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния:

$$\xi_{\beta} = 1 + 0,9(q-1)|\beta - 0,83|; \quad k_q = 10,5 - 0,2(q-1);$$

$$\lambda_{g1} = \frac{t_1 \cdot k_o^2}{1,1 \cdot k_q \cdot \delta \cdot k_{\delta}} \xi_{\beta}. \quad (3.65)$$

65. Суммарный коэффициент проводимости рассеяния статора:

$$\sum \lambda_l = \lambda_{nl} + \lambda_{ll} + \lambda_{g1}. \quad (3.66)$$

66. Индуктивное сопротивление обмотки статора:

$$X_1 = 4\pi \cdot f \mu_0 W_1^2 \frac{l_1 \cdot 10^{-3}}{pq_1} \sum \lambda_l. \quad (3.67)$$

67. Коэффициент проводимости пазового рассеяния ротора:

$$\lambda_{n2} = 0,66 + \frac{2h_1}{3(d_1 + d_2)} + \frac{h_{w2}}{b_{w2}}. \quad (3.68)$$

68. Коэффициент проводимости лобового рассеяния ротора:

$$\lambda_{l2} = \frac{D_k}{Z_2 l \Delta^2} \ln \frac{4,7 D_k}{h_k + 2l_k}, \quad (3.69)$$

где D_k – по п. 59; Δ – по п. 48.

69. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния ротора:

для к.з. ротора принимаем $\xi_{\beta} = 1$, $k_o = 1$, $q_2 = 1$.

$$k_q = 10,5 - 0,2 \cdot (q-1); \quad \lambda_{g2} = \frac{t_2}{1,1 k_q \delta \cdot k_{\delta}} \xi. \quad (3.70)$$

70. Коэффициент проводимости рассеяния скошенных пазов ротора (при скосе на 1 зубцовое деление статора при $\beta = 1$):

$$\beta_{\text{ск}} = \beta \frac{t_1}{t_2}; \quad \lambda_{\text{ск}} = t_2 \beta_{\text{ск}}^2 / 9,5 \cdot \delta \cdot k_{\delta} \cdot k_{\mu}. \quad (3.71)$$

Примечание: в АД с $h > 160$ мм скос пазов не делают.

71. Суммарный коэффициент проводимости рассеяния ротора:

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{l2} + \lambda_{g2} + \lambda_{\text{ск}}. \quad (3.72)$$

72. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора:

$$X_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} f \cdot l_2 \sum \lambda_2. \quad (3.73)$$

73. Приведенное к статорной обмотке индуктивное сопротивление ротора:

$$X'_2 = X_2 \frac{4m_1 (W_1 k_o)^2}{Z_2 k_{\text{ск}}^2}. \quad (3.74)$$

74. Параметры намагничивающего контура и сопротивление короткого замыкания:

$$X_m = \frac{U_1}{I_{\mu}}; \quad r_m = \frac{P_{cm}}{m_1 I_{\mu}^2}. \quad (3.75)$$

$$C_1 = 1 + X_1/X_m; \quad X_k = C_1 X_1 + C_1^2 \cdot X'_2. \quad (3.76)$$

Для оценки выполненных расчетов необходимо вычислить параметры в относительных единицах, принимая за базисную величину сопротивление $Z = U_1/I_{1h}$, и сравнить полученные значения со среднестатистическими данными: $r_{1*} = r_1/z = 0,02...0,08$;

$r'_{2*} = r'_2/z = 0,02 \dots 0,08$; $x_{1*} = x_1/z = 0,08 \dots 0,15$; $x'_{2*} = x'_2/z = 0,1 \dots 0,18$; $x_{m*} = x_m/z = 1,25 \dots 4$; $r_{m*} = r_m/z = 0,05 \dots 0,4$ (меньшие значения относятся к крупным машинам, большие – к машинам малой мощности).

Следует отметить, что приведенные среднестатистические величины параметров АД в относительных единицах являются лишь ориентировочными и служат только для предварительной оценки степени рациональности расчета геометрических размеров и обмоточных данных машины. Если полученные в результате расчета параметры сильно отличаются от этих ориентировочных величин, то это с высокой степенью вероятности сигнализирует, что в процессе проектирования были выбраны не совсем удачные решения (или где-то просто допущена арифметическая ошибка). Если же отклонения отдельных параметров незначительны, то можно продолжать расчет, поскольку окончательным объективным критерием всей разработки является выполнение всех исходных требований технического задания с учетом подтверждения работоспособности спроектированной машины (как будет показано ниже, работоспособность оценивается по итогам вентиляционного, теплового и механического расчетов).

В. Расчет потерь, КПД и тока холостого хода.

Потери в АД подразделяют на потери в стали (основные и добавочные), электрические потери в обмотках статора и ротора, механические и добавочные. Основные потери в стали рассчитывают только в сердечнике статора, так как частота перемагничивания ротора, равная $f_2 = sf_1$, в режимах, близких к номинальному, очень мала и потери в стали ротора даже при больших значениях индукции малы и ими пренебрегают.

При изменении нагрузки электрической машины отдельные виды потерь изменяются по-разному: электрические потери P_e в обмотках статора и ротора, а также добавочные потери $P_{\text{доб}}$ изменяются пропорционально квадрату тока нагрузки. Механические $P_{\text{мех}}$ и магнитные P_c потери в стали остаются практически постоянными – такими же, как при холостом ходе, если напряжение

машины U_1 и частота питания f_1 не изменяются. По этому признаку все виды потерь можно разделить на две группы: *постоянные потери* $P_{\text{пост}} = P_{\text{мех}} + P_c$ и *переменные потери* $P_{\text{пер}} = P_\varphi + P_{\text{доб}}$, которые можно приблизенно считать пропорциональными квадрату тока статора.

75. Основные потери в стали (т.е. потери в магнитопроводе статора):

- потери в стали зубцов статора

$$P_{z1} = k_{gz} \rho_{1,5/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1}; \quad (3.77)$$

- потери в стали спинки статора

$$P_{cl} = k_{gc} \rho_{1,5/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_{cl}^2 \cdot m_{cl}, \quad (3.78)$$

где $\rho_{1,5/50}$ и β – удельные потери в стали и показатель степени, в которой потери зависят от частоты. Их значения зависят от выбранной марки стали (например, для стали 2013 они равны $\rho_{1,5/50} = 2,5$ Вт/кг и $\beta = 1,5$; для других марок стали их значения можно найти в [1–4]); k_{gz} и k_{gc} – технологические коэффициенты увеличения потерь, которые для машин мощностью $P_{2n} < 250$ кВт можно принять равными $k_{gz} = 1,8$ и $k_{gc} = 1,6$, а при $P_{2n} > 250$ кВт $k_{gz} = 1,4$ и $k_{gc} = 1,7$; m_{z1} и m_{cl} – масса зубцов и спинки статора:

$$m_{z1} = \left\{ \frac{\pi}{4} \left[(D + 2h_{n1})^2 - D^2 \right] - Z_1 S_n \right\} l_1 k_c \rho \cdot 10^{-6}; \quad (3.79)$$

$$m_{cl} = \pi \cdot (D_1 - h_{cl}) \cdot h_{cl} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot \rho \cdot 10^{-6},$$

где S_n – по (3.25), $\rho = 7,8$ г/см³.

Основные потери в стали

$$P_c = P_{z1} + P_{cl}. \quad (3.80)$$

Добавочные потери в стали (поверхностные потери в коронках зубцов статора и ротора и пульсационные потери в теле этих зубцов):

$$P_{c,g} = P_{z1} 2,5 \sqrt{0,1 t_1 (k_o - 1)^3}. \quad (3.81)$$

Полные потери в стали:

$$P_{ct} = P_c + P_{c,g}. \quad (3.82)$$

76. Электрические потери:

– в обмотке статора

$$P_{z1} = m_1 I_1^2 r_1; \quad (3.83)$$

– в обмотке ротора

$$P_{z2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'. \quad (3.84)$$

77. Механические потери (в подшипниках и вентиляционные):

$$P_{mex} = k_m (6 \cdot n)^2 (D_1/1000)^4, \quad (3.85)$$

где $k_m = 1$ для $2p = 2$; $k_m = 1,3 \cdot (1 - D_h/1000)$ для $2p \geq 4$.

78. Добавочные потери при нагрузке (за счет потоков рассеяния, пульсаций индукции в воздушном зазоре, ступенчатости кривой распределения МДС обмоток и др.)

$$P_{dob} = 0,005 P_1. \quad (3.86)$$

79. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_2 / P_1 = 1 - \Sigma P / P_1, \quad (3.87)$$

где ΣP – сумма всех потерь.

80. Параметры холостого хода:

- электрические потери холостого хода

$$P_{\text{з10}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1; \quad (3.88)$$

- активная составляющая тока холостого хода

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{ct}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{з10}}}{3U}; \quad (3.89)$$

- ток холостого хода

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{\mu}^2}. \quad (3.90)$$

Г. Расчет рабочих характеристик.

Рабочими характеристиками называются зависимости частоты вращения ротора n_2 (или скольжения s), полезного момента на валу M_2 , тока в фазе статора I_1 , КПД η и $\cos\phi_1$ от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$. Характеристики строятся для зоны практически устойчивой работы двигателя, т.е. до скольжений $(1,1\dots 1,2)s_H$. Примерный вид рабочих характеристик, построенных в относительных единицах, представлен на рис. 3.7.

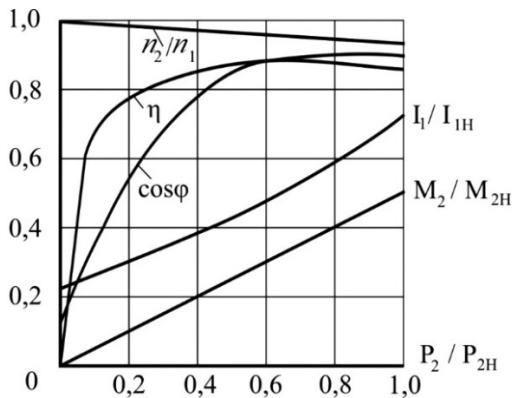


Рис. 3.7. Примерный вид рабочих характеристик АД

При переходе от режима холостого хода к режиму полной нагрузки частота вращения n_2 изменяется незначительно. При этом зависимость $n_2(P_2)$ практически линейна и кривая слабо наклонена к оси абсцисс, т.к. $s_n \approx (0,03 \dots 0,08)$. Следовательно, скоростная характеристика асинхронного двигателя является «жесткой».

Поскольку n_2 изменяется мало, зависимость $M_2(P_2)$ также близка к линейной, т.к. $P_2 = M_2 \cdot \omega_2$ и, следовательно, $M_2 = P_2 / \omega_2$ (здесь ω_2 – угловая скорость ротора).

Зависимость $I_1(P_2)$ близка к прямой. Это свидетельствует о том, что активная составляющая тока пропорциональна полезной мощности P_2 . Реактивная составляющая тока в диапазоне рабочих нагрузок меняется мало, так как она определяется током ХХ, который составляет 20...40 % от номинального тока. Поэтому зависимость $I_1(P_2)$ выходит не из начала координат.

Зависимость $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ показывает, что при малых нагрузках $\cos\varphi_1$ имеет низкие значения (0,09...0,2). С увеличением нагрузки $\cos\varphi_1$ увеличивается, достигая максимальной величины: для двигателей малой и средней мощности (1...100 кВт) $\cos\varphi_1 = 0,7 \dots 0,9$, а для двигателей большой мощности (свыше 100 кВт) $\cos\varphi_1 = 0,90 \dots 0,95$. При дальнейшем увеличении нагрузки $\cos\varphi_1$ несколько уменьшается.

Зависимость $\eta(P_2)$ имеет нелинейный характер. При холостом ходе $\eta = 0$, так как полезная мощность P_2 отсутствует. При увеличении нагрузки КПД возрастает за счет увеличения P_2 , но одновременно быстрее, чем P_2 , возрастают переменные потери $P_{\text{пер}}$. Поэтому при некотором токе увеличение КПД прекращается и в дальнейшем он начинает уменьшаться. Если взять производную $d\eta/dt$ и приравнять ее нулю, то можно получить условие максимума КПД – это наблюдается при такой нагрузке, при которой $P_{\text{пер}} = P_{\text{пост}}$.

При проектировании электрической машины обычно так распределяют потери мощности, что указанное условие выполняется при наиболее вероятной нагрузке машины, несколько меньшей номинальной. Во вращающихся электрических машинах средней и

большой мощности это условие выполняется при нагрузках примерно 60% от номинальной.

81. Расчет рабочих характеристик производится по Г-образной схеме замещения (рис. 3.8).

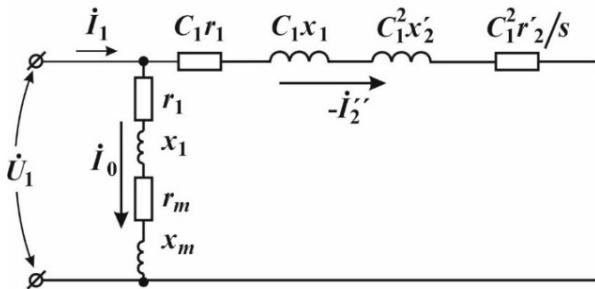


Рис. 3.8. Г-образная схема замещения асинхронного двигателя

При этом считаем, что при изменении режима работы АД от холостого хода до номинальной нагрузки параметры схемы замещения не изменяются, так как частота тока ротора изменяется в весьма узком диапазоне. Характеристики рассчитываем в функции скольжения, а кривые строим от P_2 .

Для расчета необходимы следующие исходные данные:

$$U_1, C_1, r_1, r'_2, r'_c, X_k, I_{0a}, I_{0p} = I_\mu, P_{ct}, P_{mech}.$$

Номинальное скольжение предварительно принимаем по следующему соотношению:

$$s_n' \approx r'_2 \frac{I_{1n}}{U_1}. \quad (3.91)$$

Формулы для расчета приведены в табл. 3.13. Расчет проводят, задаваясь значениями скольжения в диапазоне $s = (0,2 \dots 1,5) \cdot s_n'$.

Таблица 3.13

Порядок расчета рабочих характеристик

Наименование показателя	Формулы
1. Активное сопротивление	$R = C_1 r_1 + C_1^2 r_2' / s$
2. Полное сопротивление	$Z = \sqrt{R^2 + X_k^2}$
3. Дважды приведенный ток ротора	$I_2'' = U/Z$
4. Приведенный ток ротора	$I_2' = C_1 I_2''$
5. Активный ток статора	$I_{1a} = I_{0a} + I_2'' R/Z$
6. Реактивный ток статора	$I_{1p} = I_{0p} + I_2'' X_k/Z$, где $I_{0p} = I_\mu$
7. Полный ток статора	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$
8. Коэффициент мощности	$\cos \varphi = I_{1a} / I_1$
9. Потребляемая мощность	$P_1 = m_1 U_1 I_{1a}$
10. Электрические потери ротора	$P_{s2} = m_1 I_2'^2 r_2'$
11. Электрические потери статора	$P_{s1} = m_1 I_1^2 r_1$
12. Добавочные потери при нагрузке	$P_{\text{доб}} = 0,005 P_1$
13. Суммарные потери	$\Sigma P = P_{\text{ст}} + P_{\text{мех}} + P_{s2} + P_{s1} + P_{\text{доб}}$
14. Полезная мощность	$P_2 = P_1 - \Sigma P$
15. КПД	$\eta = P_2 / P_1$

По результатам расчета строят кривые рабочих характеристик и определяют номинальные данные, которые необходимо сравнить с исходным заданием. В случае их несовпадения необходимо произвести пересчет двигателя, изменив при этом соответствующим образом его геометрические размеры и обмоточные данные. Следует отметить, что ГОСТ Р 52776-2007 допускает снижение $\cos \varphi$ на 0,02 при условии, что произведение $(\eta \cdot \cos \varphi)_{\text{расч}} \geq (\eta \cdot \cos \varphi)$ заданного.

82. Расчет пусковых характеристик. Пусковые характеристики – это зависимости момента M и тока статора I_1 от скольжения для всего диапазона изменения скольжения от $s = 1$ до $s = s_n$.

Расчет пусковых характеристик производится также аналитическим способом по Г-образной схеме замещения аналогично расчету рабочих характеристик. При расчете пусковых характеристик необходимо учитывать два явления – вытеснение тока в пазах к.з. обмотки ротора и насыщение путей потоков рассеяния в зубцах статора и ротора. Вследствие вытеснения тока увеличивается r'_2 и уменьшается X'_2 , а вследствие насыщения уменьшаются X_1 и X'_2 . Последовательность расчета и формулы приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14

Порядок расчета пусковых характеристик

Наименование показателя	Формулы
Учет вытеснения тока	
1. Приведенная высота стержня	$\xi = 0,065 h_{\pi 2} \sqrt{S}$
2. Коэффициент вытеснения	$K_r = \xi \frac{\sinh 2\xi + \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$
3. Коэффициент демпфирования	$K_d = \frac{3}{2\xi} \frac{\sinh 2\xi - \sin 2\xi}{\cosh 2\xi - \cos 2\xi}$
4. Высота стержня при вытеснении	$h_r = h_{\pi 2} / K_r$
5. Сечение стержня	$q_c = \frac{\pi}{8} (d_1^2 + d_2^2) + \frac{d_1 + d_2}{2} h_1$
6. Ширина стержня при вытеснении	$b_r = d_2 - \frac{d_2 - d_1}{h_1} \left(h_r - \frac{d_2}{2} \right)$
7. Сечение стержня при вытеснении	$q_r = \frac{\pi d_2^2}{8} + \frac{d_2 + b_r}{2} \left(h_r - \frac{d_2}{2} \right)$
8. Коэффициент изменения активного сопротивления	$K_R = 1 + \frac{r_c}{r_2} \left(\frac{q_c}{q_r} - 1 \right)$
9. Приведенное активное сопротивление ротора при вытеснении	$r'_{2B} = K_R \cdot r'_2$

Продолжение табл. 3.14

Наименование показателя	Формулы
Учет вытеснения тока	
10. Коэффициент проводимости пазового рассеяния с учетом вытеснения тока	$\lambda_{n2B} = \lambda_{n2} K_d + \frac{h_{m2}}{b_{m2}} (1 - K_d)$
11. Коэффициент изменения индуктивного сопротивления	$K_X = 1 - \frac{\lambda_{n2} - \lambda_{n2B}}{\sum \lambda_2}$
12. Индуктивное сопротивление при вытеснении	$X'_{2B} = K_X X'_2$
13. Активное сопротивление короткого замыкания	$r_{KB} = r_1 + C_1 r'_{2B} / s$
14. Индуктивное сопротивление короткого замыкания	$X_{KB} = X_1 + C_1 X'_{2B}$
15. Полное сопротивление короткого замыкания	$Z_{KB} = \sqrt{r_{KB}^2 + X_{KB}^2}$
16. Приведенный ток ротора	$I'_{2B} = U_1 / Z_{KB}$
17. Ток статора	$I_{1B} = I'_{2B} \sqrt{r_{KB}^2 + (x_{KB} + x_m)^2} / C_1 x_m$
Учет насыщения стали	
(для каждого значения s выбираем свое значение коэффициента насыщения $k_n = I_{1H}/I_1$)	
18. Индукция в коронках зубцов	$B = \frac{0,7k_n I_1 N_n (0,25 + 0,75\beta + k_o Z_1/Z_2)}{a_1 1600 \delta \cdot (0,64 + 2,5\sqrt{\delta}/(t_1 + t_2))}$
19. Изменение ширины щлица статора	$C_s = 0,08B(t_1 - b_{m1})$
20. Изменение коэффициента проводимости пазового рассеяния статора	$\Delta \lambda_{n1H} = \frac{h_{m1}}{b_{m1}} \frac{C_s}{C_s + 1,5b_{m1}}$
21. Коэффициент проводимости пазового рассеяния статора	$\lambda_{n1H} = \lambda_{01} - \Delta \lambda_{n1H}$
22. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния	$\lambda_{g1H} = \lambda_{g1}(1 - 0,08B)$
23. Индуктивное сопротивление статора	$X_{1H} = X_1 (\lambda_{n1H} + \lambda_{g1H} + \lambda_n) / \sum \lambda_i$

Окончание табл. 3.14

Наименование показателя	Формулы
Учет насыщения	
(для каждого значения s выбираем свое значение коэффициента насыщения $k_h = I_{1h}/I_1$)	
24. Изменение ширины шлица ротора	$C_R = 0,08B(t_2 - b_{ш2})$
25. Изменение коэффициента проводимости пазового рассеяния ротора	$\Delta\lambda_{n2h} = \frac{h_{ш2}}{b_{ш2}} \cdot \frac{C_R}{b_{ш2} + C_R}$
26. Коэффициент проводимости пазового рассеяния ротора	$\lambda_{2pvh} = \lambda_{n2v} - \Delta\lambda_{n2h}$
27. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния ротора	$\lambda_{d2h} = \lambda_{d2}(1 - 0,08B)$
28. Индуктивное сопротивление ротора с учетом вытеснения и насыщения	$X_{2vh} = X'_{2vh} (\lambda_{n2vh} + \lambda_{d2h} + \lambda_{l2}) / \sum \lambda_2$
29. Индуктивное сопротивление короткого замыкания с учетом вытеснения и насыщения	$X_{kvh} = X_{1h} + X_{2vh}$
30. Полное сопротивление короткого замыкания с учетом вытеснения и насыщения	$Z_{kvh} = \sqrt{R_{kv}^2 + X_{kvh}^2}$
31. Приведенный ток ротора	$I'_{2vh} = U_1 / Z_{kvh}$
32. Ток статора	$I_{1vh} = \frac{I'_{2vh}}{C_1 X_m} \sqrt{r_{kv}^2 + (x_{kvh} + x_m)^2}$
33. Кратность тока	$K_I = I_{1vh} / I_{1nom}$
34. Кратность момента	$K_M = \left(\frac{I'_{2vh}}{I'_{2hom}} \right)^2 \cdot K_R \frac{s_h}{s}$

Сначала рассчитываем пусковые токи при $s = 1$ без учета насыщения. Затем задаемся коэффициентом насыщения k_h и для токов $I_{1нас} = k_h \cdot I_1$ и $I'_{2нас} = k_h \cdot I'_2$ рассчитываем токи I_{1vh} и I'_{2vh} , при этом расхождение между токами $I_{1нас}$ и I_{1vh} , а также между $I'_{2нас}$ и I'_{2vh}

должно быть не более 10...15%, в противном случае необходимо изменить k_h и повторить расчет. При $s = 1$ величина $k_h = 1,2...1,4$. Для уменьшения объема вычислений других точек характеристик определяют приближенное значение критического скольжения $s_{kp} \approx r'_2 / (X_1/C_1 + X'_2)$ и принимают для этого скольжения $k_h = 1,05...1,2$. Для определения k_h в диапазоне от $s = 1$ до $s = s_{kp}$ принимают, что его изменение в этом диапазоне происходит по линейному закону. Значение s_{kp} уточняется после расчета зависимости $K_M = M/M_h = f(s)$. При расчете k_r и k_d (п.п. 2 и 3 табл. 3.14) гиперболические функции вычисляются по формулам:

$$\operatorname{sh} 2\xi = \frac{e^{2\xi} - e^{-2\xi}}{2}; \quad \operatorname{ch} 2\xi = \frac{e^{2\xi} + e^{-2\xi}}{2}, \quad (3.92)$$

где $e = 2,718$.

По результатам расчета пусковых характеристик строят кривые $K_M = f(s)$ и $K_I = f(s)$ и определяют пусковые свойства и перегруженную способность АД: $K_M = M_n/M_h$; $K_I = I_n/I_{1n}$; $K_{\text{пер.}} = M_{\text{макс}}/M_h$. Эти значения должны удовлетворять требованиям исходного задания на проектирование. Примерный вид пусковых характеристик показан на рис. 2.2.

Полученный в расчете коэффициент насыщения при $s = 1$, равный $k_h = I_{1bh}/I_1$, необходимо сравнить с ранее выбранным k_h (см. п. 9 табл. 3.7). Их расхождение не должно составлять более $\pm 5\%$.

Результаты электромагнитного расчета надо сравнить с исходными требованиями задания. Это сравнение необходимо представить в виде таблицы, где приводятся величины параметров по заданию и их расчетные значения. После этого необходимо проанализировать полученные выходные показатели и сделать вывод о соответствии спроектированной машины исходным требованиям. При этом необходимо иметь в виду, что согласно ГОСТ Р 52776-2007 выходные показатели машины могут иметь допустимые отклонения от номинальных величин, например, -15% для кратности начального пускового момента,

+20% пускового тока, –10% для кратности максимального критического момента. Минимальное допустимое значение КПД η_{\min} равно:

$$\eta_{\min} = \eta_h - 0,15(1 - \eta_h).$$

Пример электромагнитного расчета трехфазного АД общего назначения с к.з. ротором и обмоткой статора из провода круглого сечения показан в следующей главе.

3.4. Оценка работоспособности спроектированной машины

Для оценки работоспособности спроектированной машины необходимо проверить нагрев обмотки статора как наиболее уязвимого в тепловом отношении узла АД, оценить эффективность охлаждения машины, а также проверить, удовлетворяет ли конструкция требованиям прочности и жесткости. Для этого необходимо выполнить тепловой, вентиляционный и механический расчеты.

3.4.1. Вентиляционный расчет

Вопросы расчета охлаждения и нагрева машины являются одними из основных задач при ее проектировании [7,8]. Необходимо так спроектировать машину в тепловом и вентиляционном отношении, чтобы она обеспечивала оптимальную температуру, определяемую используемым классом нагревостойкости изоляции, при минимальном расходе материалов. При этом для повышения надежности работы машина должна обладать тепловым запасом на случай возможных перегрузок. Таким образом, вентиляционный и тепловой расчеты должны быть органически связаны с электромагнитным расчетом.

Нагрев машины однозначно зависит от эффективности ее охлаждения. В АД наибольшее распространение имеют принудительное охлаждение. Для этого двигатель снабжен вентилятором, который устанавливается или на валу машины, или вращается от постороннего привода.

Вентиляционный расчет проводится в целях оценки рациональной схемы вентиляции, при которой количество охлаждающего воздуха, обеспечиваемого вентилятором, должно соответствовать количеству снимаемого с поверхности тепла и обеспечивать заданный уровень превышения температуры обмоток машины.

В процессе вентиляционного расчета машины необходимо:

- определить требуемый расход воздуха Q , т.е. объем воздуха в м^3 , который необходимо ежесекундно прогонять через машину для удаления тепла, выделяемого в машине за счет потерь в ней. При этом принять, что охлаждающий воздух отводит все тепло машины, за исключением механических потерь в подшипниках и вентиляторе;
- рассчитать аэродинамические параметры спроектированного воздушного тракта машины, т.е. пути протекания охлаждающего воздуха;
- выбрать наиболее рациональный тип вентилятора и рассчитать его размеры;
- вычислить действительный расход воздуха и давление (напор), Q' , которые обеспечивает рассчитанный вентилятор при данных размерах машины и ее системы вентиляции;
- оценить путем сравнения требуемого расхода воздуха Q , необходимого для охлаждения двигателя, с расходом Q' , который обеспечивается спроектированным вентилятором.

Система вентиляции считается эффективной, если в результате расчета получено, что $Q' > Q$.

Расчет и проектирование вентиляции базовых конструктивных исполнений асинхронных электродвигателей достаточно подробно описаны в различной специальной литературе. Однако при этом приводятся, в основном, только упрощенные методики вентиляционного расчета, основанные на статистических данных, полученных именно для базовых исполнений АД. Поэтому приведем полную методику расчета, разработанную с учетом реальных процессов охлаждения и теплоотвода асинхронных электродвигателей.

Для вентиляционного расчета необходимо иметь чертежи продольного и поперечного разрезов АД, по которым определяются пути прохождения охлаждающего воздуха. При этом

выясняют возможные повороты, сужения, расширения и разделение на параллельные струи воздушного потока на отдельных участках воздухопровода и составляют в случае необходимости (т.е. при сложном воздухопроводе) эквивалентную аэродинамическую схему замещения машины. Затем, рассчитав или определив по чертежу поперечное сечение каждого участка, вычисляют коэффициенты ξ_i и аэродинамические сопротивления Z_i этих участков. На основании схемы замещения находят суммарное сопротивление воздухопровода Z . Затем производят расчет вентилятора и определяют действительный расход воздуха Q' , давление H и мощность $P_{\text{вент}}$, потребляемую вентилятором.

После этого производят оценку спроектированного вентиляционного узла включая вентилятор с точки зрения эффективности охлаждения.

Расчет расхода воздуха, необходимого для охлаждения электродвигателя

При определении теплоотдачи с закрытой обдуваемой поверхности коэффициент теплоотдачи излучением $\alpha_{\text{и}}$ принимается равным нулю, а температура охлаждающего воздуха – среднему значению температур на входе и выходе вентиляционного узла электродвигателя.

Требуемый для охлаждения машины расход воздуха:

$$Q = \frac{\sum P_{\text{в}}}{C_{\text{в}} \Delta t}, \quad (3.93)$$

где $\sum P_{\text{в}}$ – сумма греющих потерь, отводимых охлаждающим воздухом, Вт; $C_{\text{в}} = 1100 \text{ Дж}/^{\circ}\text{С} \cdot \text{м}^3$ – объемная теплоемкость воздуха; Δt – разность температур воздуха на выходе $t_{\text{вых}}$ и входе $t_{\text{вх}}$ машины:

$$\Delta t = t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}. \quad (3.94)$$

Для закрытых машин Δt можно брать равной 10...20% допускаемого для данного класса превышения температуры обмотки (допустимое превышение температуры для изоляции класса B составляет 80°C , для изоляции класса $F - 100^{\circ}\text{C}$).

Эквивалентная аэродинамическая схема замещения электродвигателя

Асинхронные двигатели со степенью защиты IP44 (или IP54) имеют способ охлаждения IC0141, т. е. выполняются само обдуваемыми за счет вентилятора, расположенного на валу. При вращении вентилятор создает аэродинамический напор, за счет которого и перемещается воздух. Этот способ охлаждения предусматривает свободную циркуляцию воздуха, т.е. воздух свободно подводится из окружающей среды к машине и свободно возвращается в эту среду. Система самовентиляции при помощи установленного на валу вентилятора используется для машин, работающих при небольших изменениях частоты вращения и имеющих окружную скорость по наружному диаметру вентилятора $U_2 \geq 6 \text{ м/с}$.

Вентиляционная цепь закрытого обдуваемого электродвигателя со степенью защиты IP44 показана на рис. 3.9, где путь протекания охлаждающего воздуха показан стрелками.

При вращении вентилятора его рабочее колесо создает ближе к своей оси вращения разряжение, за счет которого происходит всасывание воздуха из окружающей среды через вентиляционные отверстия, выполненные в кожухе вентилятора. Далее воздух попадает внутрь рабочего колеса и получает вращательное движение. При этом возникают центробежные силы, за счет которых воздух принудительно перемещается в радиальном направлении по рабочему колесу. На выходе из вентилятора воздух тем самым получает приращение давления и скорости потока за счет этой энергии. Затем кожух вентилятора направляет поток воздуха на оребренную станину статора, изменяя направление его движения на 90° .

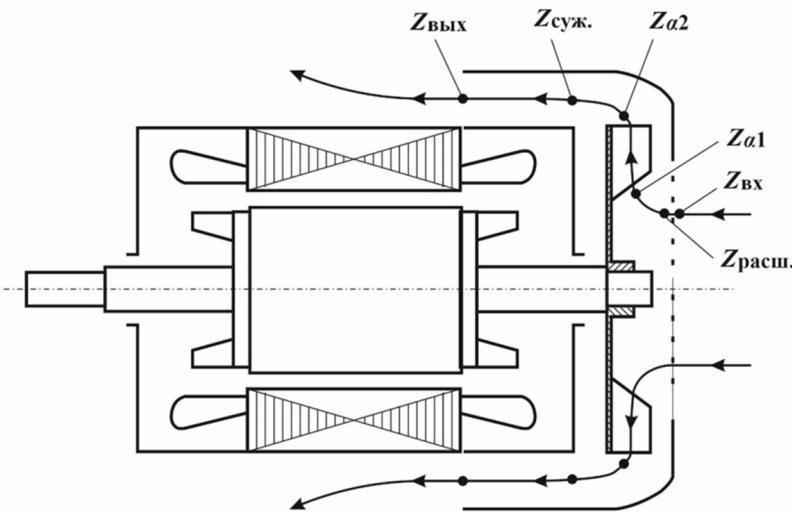


Рис. 3.9. Схема вентиляции асинхронного электродвигателя со степенью защиты IP44

Составим эквивалентную аэrodинамическую схему замещения электродвигателя.

Известно, что из-за затрат энергии на преодоление сопротивлений движения, энергия воздуха уменьшается по направлению его движения. Эти аэrodинамические сопротивления обусловлены различными препятствиями на пути воздуха, приводящими к изменению или величины, или направления его скорости, а также силами трения воздуха об конструктивные детали двигателя.

При составлении эквивалентной аэrodинамической схемы замещения электрической машины ее вентиляционную цепь разделяем на ряд отдельных однородных участков. В зависимости от фактического пути прохождения охлаждающего воздуха эти участки на схеме замещения соединяем между собой или последовательно, или параллельно.

Вводя аналогию между аэrodинамическими и электрическими цепями, аэrodинамическое сопротивление каждого i -го участка вычисляют через отношение массового расхода Q_i охлаждающего воздуха на данном участке к потерям давления H_i на нем.

Для вычисления необходимого давления H , которое должен развить вентилятор для преодоления аэродинамического сопротивления воздушного тракта ЭМ, необходимо рассчитать параметр Z , который называют аэродинамическим сопротивлением. Для i -го участка:

$$Z_i = \frac{H_i}{Q_i} \text{ или } Z_i = \frac{\xi_i}{(2\rho S_i^2)},$$

где ρ – плотность охлаждающего воздуха; ξ_i и S_i – коэффициент аэродинамического сопротивления и сечение i -го участка аэродинамической цепи.

Численные значения аэродинамических коэффициентов ξ_i определяются опытным путем в зависимости от вида местного сопротивления. Конечно, расчет с использованием этих коэффициентов не обладает высокой точностью, но при этом позволяет корректно выбрать конфигурацию и геометрические размеры отдельных участков вентиляционного тракта и оценить эффективность спроектированной вентиляционной системы.

Вентиляционную систему любой сложности можно рассматривать в виде цепи вентиляционных каналов, включенных относительно друг друга последовательно или параллельно. Если n участков вентиляционной схемы соединены последовательно, то очевидно, что в следствие неразрывности течения, на всех участках расход воздуха Q постоянный, а потеря давления от входа a до выхода b равна:

$$H_{ab} = \sum_{i=1}^n H_i .$$

Соответственно, суммарное аэродинамическое сопротивление между точками a и b равно:

$$Z_{ab} = \sum_{i=1}^n Z_i .$$

Конечным результатом вентиляционного или гидравлического расчета систем охлаждения является определение номинального напора $H_{\text{ном}}$ вентилятора или нагнетательного устройства, обеспечивающего номинальный расход охлаждающей среды $Q_{\text{ном}}$ при расчетном суммарном сопротивлении всей схемы охлаждения $Z_{\text{ном}}$:

$$H_{\text{ном}} = Z_{\text{ном}} Q_{\text{ном}}^2.$$

Анализируя вентиляционную цепь электродвигателя, приведенную на рис. 3.9, можно выделить шесть местных потерь давления:

- 1) сужение потока воздуха при входе в вентиляционные отверстия кожуха вентилятора;
- 2) расширение потока воздуха при выходе из кожуха вентилятора;
- 3) поворот на угол α_1 при входе в вентилятор;
- 4) поворот на угол α_2 при выходе из вентилятора;
- 5) сужение при входе в межреберные каналы станины;
- 6) выход из кожуха вентилятора.

Силами трения в машинах степени защиты IP44 можно пре-небречь. Соответственно, на эквивалентной аэrodинамической схеме замещения электродвигателя указанные местные потери давления изобразим в виде соответствующих аэrodинамических сопротивлений (рис. 3.10).

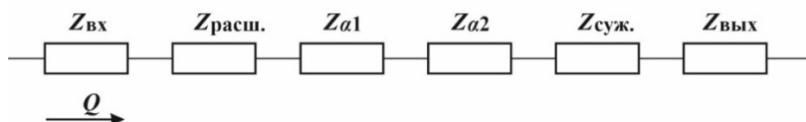


Рис. 3.10. Эквивалентная аэродинамическая схема замещения вентиляционной цепи закрытого обдуваемого электродвигателя

Расчет аэродинамических сопротивлений можно произвести по методике, предложенной в [9,10]. Расчет производительности Q и напора H производится на основании параметров вентилятора [8].

Расчет вентиляционной цепи электродвигателя

Вычислим величины указанных аэrodинамических сопротивлений, входящих в эквивалентную аэrodинамическую схему замещения АД.

1. Диаметр решетки, на котором расположены входные отверстия (рис. 3.11):

$$D_p = (0,7 \dots 0,9) D_1. \quad (3.95)$$

Отверстия могут быть любой формы с максимальным линейным размером не более 10 мм. Площадь отверстия $S_o = a_o b_o$. Перемычки между отверстиями $b_{\text{пер}} = 1 \dots 5$ мм.

2. Количество отверстий:

$$N_o = \frac{k_{3,0} \pi D_p^2}{4(b_o + b_{\text{пер}})^2}, \quad (3.96)$$

где $k_{3,0} = 0,7 \dots 0,9$ – коэффициент заполнения торцевой поверхности вентиляционного кожуха входными вентиляционными отверстиями.

3. Коэффициент аэrodинамического сопротивления входа:
– для кожуха вентилятора с решеткой, имеющей острые края

$$\xi_{\text{вх}} = \left(\frac{1,707}{f} - 1 \right)^2; \quad (3.97)$$

– для решеток, имеющих скошенные или закругленные отверстия

$$\xi_{\text{вх}} = \frac{\left(1 + \sqrt{\xi'} - f \right)^2}{f^2}, \quad (3.98)$$

где $f = S_{\text{отв}}/S_p = N_o S_o / S_p$; $S_{\text{отв}}$ – сечение отверстий; S_p – сечение решетки:

$$S_p = \pi D_p^2 / 4. \quad (3.99)$$

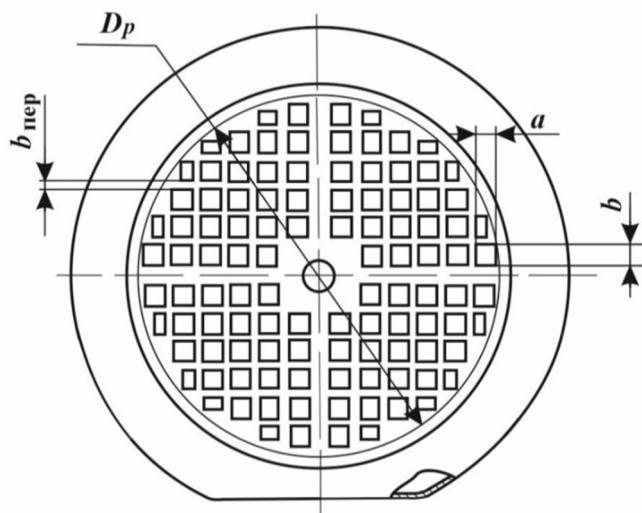
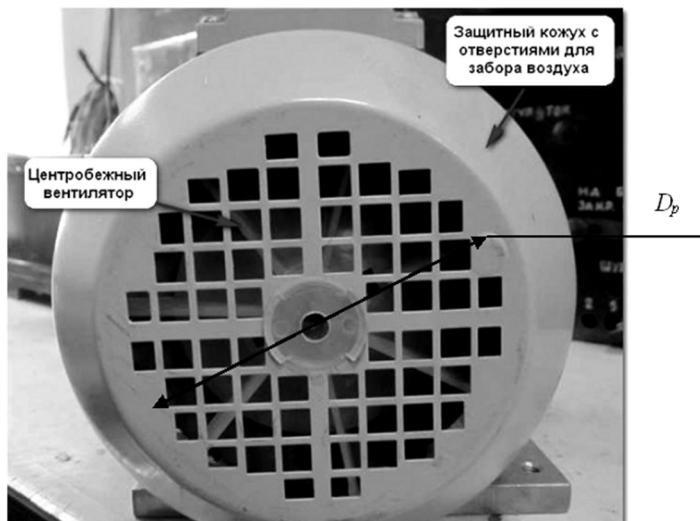


Рис. 3.11. Кожух вентилятора: общий вид и эскиз с указанием основных размеров

Коэффициент ξ выбирается по табл. 3.15 или 3.16. В этих таблицах D_z – гидравлический диаметр:

$$D_z = 4 \cdot S_o / P_o , \quad (3.100)$$

где S_o – площадь отверстия; P_o – периметр отверстия.

Для квадратных и круглых отверстий $D_z = d_o$.

Таблица 3.15

Коэффициент ξ для скошенных под углом α отверстий решетки

l/D_z	0,025	0,05	0,075	0,1	0,15	0,6
$\alpha = 30^\circ$	0,43	0,36	0,30	0,25	0,2	0,13
$\alpha = 40^\circ$	0,41	0,33	0,26	0,22	0,16	0,11
$\alpha = 60^\circ$	0,40	0,30	0,23	0,18	0,15	0,12

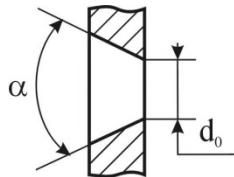
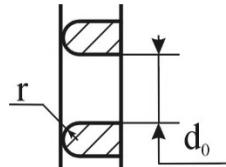


Таблица 3.16

Коэффициент ξ для закругленных радиусом r отверстий решетки

r/D_z	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
ξ	0,5	0,44	0,37	0,31	0,26	0,22
r/D_z	0,06	0,08	0,1	0,12	0,16	0,20
ξ	0,19	0,15	0,12	0,09	0,06	0,02



При $h < 90$ мм выбирают кожух с решеткой, имеющей острые края:

$$f = \frac{N_o S_o}{S_p}. \quad (3.101)$$

Коэффициент сопротивления входа для такой решетки вычисляют по (3.97).

4. Аэродинамическое сопротивление входа:

$$Z_{bx} = \xi_{bx} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{bx}^2}. \quad (3.102)$$

Здесь $S_{bx} = N_o S_o$.

Коэффициенты и аэродинамические сопротивления остальных участков воздухопровода:

5. Аэродинамическое сопротивление расширения в кожухе вентилятора:

$$\xi_{расш} = \left(1 - \frac{S_{1\min}}{S_{\max}} \right)^2; \quad (3.103)$$

$$Z_{расш} = \xi_{расш} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{1\min}^2}, \quad (3.104)$$

здесь $S_{1\min} = S_{bx}$; S_{\max} – поперечная площадь сечения зоны под кожухом:

$$S_{\max} = S_{кож} = \pi \cdot D_{кож}^2 / 4, \quad (3.105)$$

где $D_{кож}$ – наружный диаметр кожуха вентилятора:

$$D_{кож} = D_1 + 2 \cdot (h_{ct} + h_{peb}), \quad (3.106)$$

где $h_{ct} = (0,05 \dots 0,07)h$ – толщина станины; $h_{peb} = (0,15 \dots 0,25)h$ – высота ребра.

6. Аэродинамическое сопротивление поворота воздуха к вентилятору на угол α_1 (α_1 – угол наклона воронки вентилятора к оси вращения; обычно $\alpha_1 = 60^\circ$):

$$\xi_{\alpha_1} = A \left(0,95 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} + 2,05 \sin^4 \frac{\alpha_1}{2} \right). \quad (3.107)$$

Коэффициент A принимаем по табл. 3.17.

Таблица 3.17

Значение коэффициента A

α_1 , град.	20	30	45	60	75	90...180
A	2,5	2,22	1,87	1,5	1,28	1,2

$$Z_{\alpha_1} = \xi_{\alpha_1} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{\text{кож}}^2}. \quad (3.108)$$

7. Аэродинамическое сопротивление поворота воздуха при входе из вентилятора на угол $\alpha_2 = 60^\circ$:

– коэффициент ξ_{α_2} вычисляют по формуле (3.107), а аэродинамическое сопротивление Z_{α_2} – по формуле (3.108).

8. Аэродинамическое сопротивление сужения потока воздуха при входе в станину:

$$\xi_{\text{суж}} = 0,5 \left(1 - \frac{S_{2\text{мин}}}{S_{\text{макс}}} \right)^2. \quad (3.109)$$

Здесь

$$S_{2\text{мин}} = \pi / 4 (D_{\text{кож}}^2 - D_{\text{стан}}^2); \quad D_{\text{стан}} = D_1 + 2 \cdot h_{\text{стан}} \quad S_{\text{макс}} = S_{\text{кож}};$$

$$Z_{\text{суж}} = \xi_{\text{суж}} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{2\text{мин}}^2}. \quad (3.110)$$

9. Аэродинамическое сопротивление выход из кожуха вентилятора:

$$\xi_{\text{вых}} = 1; \quad Z_{\text{вых}} = \xi_{\text{вых}} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{2\text{вых}}^2}. \quad (3.111)$$

10. Суммарное сопротивление воздухопровода:

$$Z = Z_{\text{вх}} + Z_{\text{расш}} + Z_{\text{a1}} + Z_{\text{a2}} + Z_{\text{суж}} + Z_{\text{вых}}. \quad (3.112)$$

Особенности конструирования и расчет вентиляторов электрических машин

Назначение вентилятора заключается в передаче механической энергии от вращающегося вала электродвигателя потоку воздуха путем аэродинамического воздействия на него лопаток колеса вентилятора.

Поскольку встроенный вентилятор конструктивно связан с электрической машиной, то при его проектировании необходимо учитывать следующие особенности:

- частота вращения вентилятора равна частоте вращения электрической машины;
- размеры вентилятора ограничены конструктивными размерами электрической машины и определяются конфигурацией и размерами места установки вентилятора;
- расход и давление охлаждающего воздуха, которые должен обеспечить вентилятор, зависят от аэродинамической характеристики воздушного тракта машины и от выбранного типа системы вентиляции;
- центробежные вентиляторы развивают большой напор, но имеют низкий механический КПД (с лопатками, отогнутыми вперед $\eta = 0,3 \dots 0,4$; с радиальными лопатками $\eta = 0,15 \dots 0,2$; с лопатками, отогнутыми назад $\eta = 0,25 \dots 0,3$);

– осевые вентиляторы характеризуются тем, что развивают небольшой напор, но имеют достаточно большой КПД, равный $\eta = 0,8$.

Выбор типа вентилятора следует производить с учетом следующих факторов:

– КПД вентилятора должен быть максимально возможным, так как он влияет на полный КПД электродвигателя;

– аэrodинамический шум и вибрация, создаваемые вентилятором, должны быть минимальными, так как они в значительной степени определяют общие виброакустические свойства двигателя.

Специфика конструкции электрических машин такова, что аэrodинамическое сопротивление охлаждающего тракта у машин малой и средней мощности достаточно велико. Поэтому для обеспечения требуемого расхода газа следует создать большое давление, что обуславливает выбор центробежного вентилятора. Если при этом электрическая машина должна обеспечивать реверсивную работу, то применяется только центробежный вентилятор с радиальными лопатками, имеющий наиболее низкий КПД.

Для машин с высотами осей вращения от 50 до 132 мм вентиляторы, а также кожух, изготавливают из пластмассы. При этом допускается использовать литой вентилятор из алюминиевого сплава АЛ-9 и стальной кожух. Для машин с высотами осей вращения $h \geq 132$ мм вентиляторы изготавливают из алюминиевого сплава и армируют стальной втулкой.

Крепление вентилятора на валу должно исключать возможность его прокручивания относительно вала, а также перемещения в осевом направлении. Вентиляторы крепятся на валу с помощью захватных ступиц, шпонок или на накатанный конец вала без дополнительного крепления.

Конструкция вентилятора показана на рис. 3.12.

При выполнении данного раздела расчета необходимо, кроме того, ознакомиться с конструктивными способами повышения эффективности вентиляции и снижения вентиляционного шума [7,8].

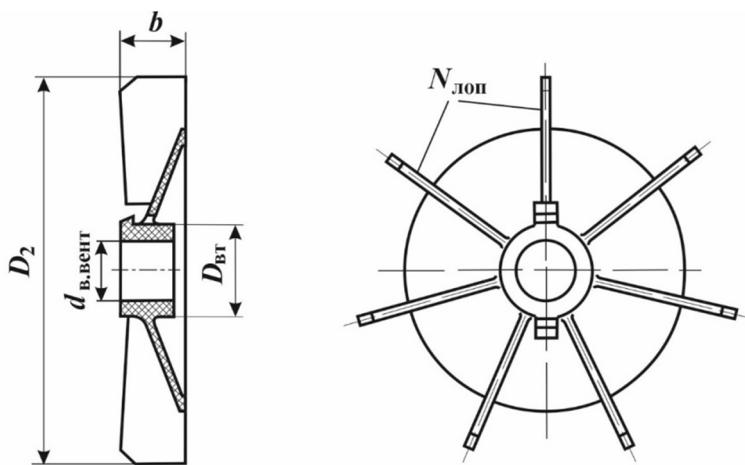


Рис. 3.12. Конструкция центробежного вентилятора

*Расчет центробежного вентилятора
с радиальными лопатками*

11. Наружный диаметр вентилятора:

$$D_2 = (0,8 \dots 0,9) D_{\text{кож}} . \quad (3.113)$$

12. Окружная скорость лопатки:

$$U_2 = \pi D_2 n . \quad (3.114)$$

13. Максимальный расход воздуха (при отсутствии внешнего сопротивления, т.е. при $Z = 0$):

$$Q_m = 2Q . \quad (3.115)$$

14. Площадь выходного сечения вентилятора:

$$S_2 = \frac{Q_m}{0,42 U_2} . \quad (3.116)$$

15. Ширина лопатки:

$$b = \frac{S_2}{0,92\pi D_2}. \quad (3.117)$$

16. Лопатки прикрепляют к втулке, поэтому внутренний диаметр лопатки равен диаметру втулки вентилятора:

$$D_{\text{вт}} = (1,05 \dots 1,3) d_{\text{в}}. \quad (3.118)$$

17. Средний внутренний диаметр вентилятора:

$$D_1 = (1,2 \dots 1,4) D_{\text{вт}}. \quad (3.119)$$

Диаметр D_1 уточняется при конструировании вентилятора.

18. Окружная скорость лопаток на среднем внутреннем диаметре:

$$U_1 = \pi D_1 n. \quad (3.120)$$

19. Давление холостого хода вентилятора:

$$H_{\text{o}} = \eta_{\text{o}} \cdot \rho (U_2^2 - U_1^2), \quad (3.121)$$

где η_{o} – аэродинамический КПД вентилятора: для вентилятора с радиальными лопатками $\eta_{\text{o}} = 0,6$; при лопатках, загнутых назад, $\eta_{\text{o}} = 0,5$; при лопатках, загнутых вперед, $\eta_{\text{o}} = 0,75$; $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воздуха.

20. Действительный расход воздуха:

$$Q' = Q_m \sqrt{\frac{H_{\text{o}}}{H_{\text{o}} + Z \cdot Q_m^2}}. \quad (3.122)$$

Вентилятор должен обеспечивать расход не меньше требуемого.

21. Давление вентилятора:

$$H = ZQ'^2 . \quad (3.123)$$

22. Мощность, потребляемая вентилятором (потери на вентиляцию):

$$P_{\text{вент}} = Q' H / \eta_{\text{в}} , \quad (3.124)$$

где $\eta_{\text{в}}$ – механический КПД вентилятора: при радиальных лопатках $\eta_{\text{в}} = 0,15\dots 0,20$; при лопатках, загнутых вперед, $\eta_{\text{в}} = 0,3\dots 0,4$; при лопатках, загнутых назад, $\eta_{\text{в}} = 0,25\dots 0,3$.

23. Число лопаток вентилятора $N_{\text{лоп}}$ берут в зависимости от диаметра вентилятора в пределах 5…13. Количество $N_{\text{лоп}}$ выбирается для уменьшения вентиляционного шума равным нечетному числу, причем при $2p = 2$ обычно берут $N_{\text{в}} = 5$.

3.4.2. Тепловой расчет

Тепловой расчет заключается в определении превышений температуры активных частей АД над температурой окружающего воздуха при продолжительном режиме работы, которые не должны превышать допустимых по ГОСТ 8865-93 значений для выбранного класса нагревостойкости. На основании данного расчета делается вывод о правильности выбора электромагнитных нагрузок и о целесообразности применения электроизоляционных материалов данного класса нагревостойкости.

На первом этапе расчет превышения температуры проводится по упрощенной методике теплового расчета, в которой используются средние значения коэффициентов теплоотдачи, теплопроводности и подогрева воздуха, характерные для АД 4А [1,2,3]. В дальнейшем необходимо выполнить уточненный тепловой расчет с помощью эквивалентных тепловых схем замещения. Такой расчет будет рассмотрен в главе 6.

Упрощенная методика теплового расчета

Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta V_{\text{Пов.1}} = K \frac{P'_{\text{э.пл}} + P_e}{\pi D l_1 \alpha_1}, \quad (3.125)$$

где $P'_{\text{э.пл}}$ – потери в пазовой части обмотки; α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности; K – коэффициент, учитывающий, что часть потерь, выделяющихся в сердечнике статора и в пазовой части обмотки, передается через станину непосредственно в окружающую среду (выбирают по табл. 3.18).

Таблица 3.18

Средние значения коэффициента K для асинхронных двигателей серии 4А

Исполнение двигателя по степени защиты	Число полюсов двигателя $2p$					
	2	4	6	8	10	12
IP44	0,22	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16
IP23	0,84	0,80	0,78	0,76	0,74	0,72

Величина α_1 зависит от исполнения машины и выбирается в зависимости от высоты оси вращения и числа пар полюсов. Для асинхронных двигателей исполнения IP44 для $h < 160$ α_1 выбирается по рис. 3.13, а для других типоисполнений машин – по кривым, приведенным в [1,2].

Потери в пазовой части обмотки:

$$P'_{\text{э.пл}} = k_p P_{\text{пл}} \frac{2l_1}{l_{\text{ср.1}}}, \quad (3.126)$$

где k_p – коэффициент увеличения потерь: для изоляции класса В значение k_p принимают равным $k_p = 1,15$, а для класса F принимают $k_p = 1,07$.

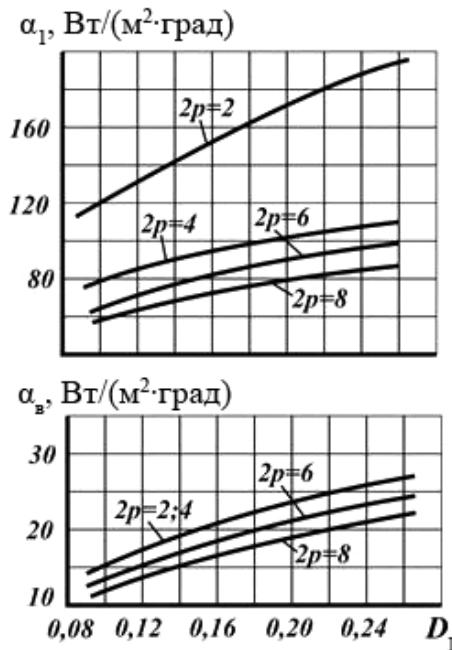


Рис. 3.13. Средние значения коэффициентов теплоотдачи с поверхности α_1 и подогрева воздуха α_a для АД исполнения IP44 для $h < 160$ мм

Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора

$$\Delta V_{Из,п1} = \frac{P'_{э,п1}}{Z_1 \Pi_{п1} l_1} \left(\frac{b_{из,1}}{\lambda_{экв}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{экв}} \right), \quad (3.127)$$

где $\Pi_{п1} = 2h_{п1} + b_1 + b_2$ – расчетный периметр поперечного сечения паза; $\lambda_{экв} = 0,16$ Вт/м·град – средний эквивалентный коэффициент теплопроводности пазовой изоляции с учетом воздушных прослоек; $\lambda'_{экв}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности внутренней изоляции катушки из круглого провода, который выбирается по рис. 3.14.

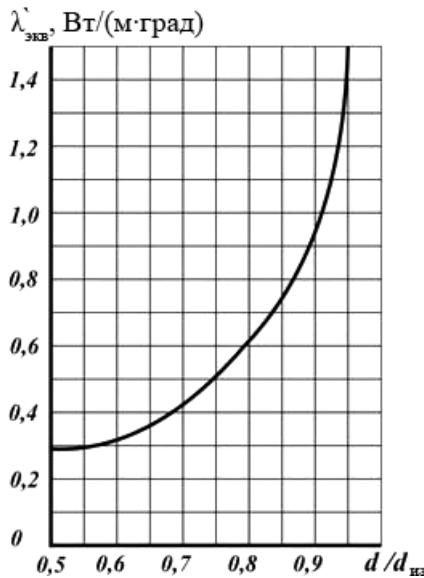


Рис. 3.14. Средние значения коэффициентов теплопроводности $\lambda'_{экв}$ внутренней изоляции катушек встыпной обмотки из эмалированного провода

Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей

$$\Delta V_{из.л1} = \frac{P'_{э.л1}}{2Z_1 \Pi_{л1} l_{л}} \frac{h_{п1}}{12\lambda'_{экв}}, \quad (3.128)$$

где $P'_{э.л1} = k_p P_{о1} 2l_{л} / l_{ср.1}$ – потери в лобовой части обмотки.

Периметр поперечного сечения условной поверхности охлаждения лобовой части одной катушки принимаем $\Pi_{л1} \approx \Pi_{п1}$.

Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины

$$\Delta V_{Пов.л1} = \frac{K \cdot P'_{э.л1}}{2\pi \cdot D l_{выл.1} \alpha_1}. \quad (3.129)$$

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины:

$$\Delta V'_1 = \frac{2}{l_{\text{cp1}}} [(\Delta V_{\text{пов.1}} + \Delta V_{\text{л1}})l_1 + (\Delta V_{\text{пов.л1}} + \Delta V_{\text{из.л1}})l_{\text{л}}]. \quad (3.130)$$

Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающего воздуха:

$$\Delta V_B = \frac{\Sigma P'_B}{S_{\text{дв}} \alpha_B}, \quad (3.131)$$

где $\Sigma P'_B$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя:

$$\begin{aligned} \Sigma P'_B = & \Sigma P + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{ш1}} + P_{\text{ш2}}) - \\ & - (1 - K) \cdot (P'_{\text{ш.п1}} + P_c) - 0,9 \cdot P_{\text{мех}}; \end{aligned} \quad (3.132)$$

$S_{\text{дв}}$ – условная поверхность охлаждения двигателя:

$$S_{\text{дв}} = (\pi D_1 + 8\pi p) \cdot (l_1 + 2l_{\text{выл.1}});$$

P_p – периметр поперечного сечения ребер станины; α_B – коэффициент подогрева воздуха.

Отметим, что для двигателей со степенью защиты IP44 при расчете $\Sigma P'_B$ не учитывают мощность, потребляемую наружным вентилятором, которая составляет примерно $0,9P_{\text{мех}}$.

Значение P_p выбирается по рис. 3.15, а величину α_B по рис. 3.13.

Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха:

$$\Delta V_1 = \Delta V'_1 + \Delta V_B. \quad (3.133)$$

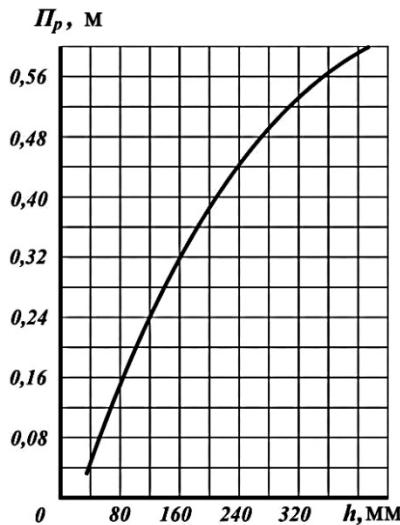


Рис. 3.15. Среднее значение периметра поперечного сечения ребер асинхронных двигателей серии 4А

Полученное превышение температуры обмотки статора необходимо сравнить с допустимым значением для выбранного класса нагревостойкости изоляции (табл. 3.2).

3.4.3. Механический расчет

При выборе двигателя для использования в конкретном приводном механизме наряду с его основными номинальными данными необходимо знать допустимую нагрузку на выходной конец вала. Работоспособность двигателя определяется следующими факторами: допускаемым прогибом вала; соотношением номинальной и критической частот вращения; допускаемым напряжением, определяемым материалом вала; долговечностью подшипников при заданных нагрузке и частоте вращения. Соответственно этому для АД проводят следующие механические расчеты: расчет вала на жесткость и прочность, расчет критической частоты вращения и расчет подшипников.

Вал должен иметь достаточную жесткость, чтобы при работе машины его прогиб под действием приложенных к нему радиальных сил не достигал значений, при которых будет значительное искажение равномерности воздушного зазора δ между статором и ротором. Результирующий прогиб вала АД не должен превышать 10% от величины δ .

Поскольку вал представляет собой упругую систему, то если ее вывести из равновесия, она будет совершать колебательные движения относительно точки равновесия. Частота этих собственных колебаний определяется жесткостью вала и массой ротора. Наиболее неблагоприятным случаем является резонанс колебаний, когда частота собственных колебаний $f_{\text{соб}}$ равна частоте вынужденных колебаний $f_{\text{вын}}$, которые вызываются внешними силами, приложенными к валу. Величина $f_{\text{вын}}$ зависит от частоты вращения ротора. Частота вращения, при которой наступает резонанс, называется критической $n_{\text{кр}}$. Для надежности работы вала необходимо, чтобы номинальная частота вращения $n_{\text{ном}}$ была меньше $n_{\text{кр}}$ по крайней мере на 30%.

Кроме того, вал должен быть достаточно прочным во всех сечениях и без остаточных деформаций выдерживать все нагрузки от вращающегося и изгибающегося моментов. Для оценки прочности вала необходимо рассчитать эквивалентные значения напряжений $\sigma_{\text{экв}}$ на различных участках вала и сравнить их с допустимым напряжением, которое составляет 0,7 от предела текучести σ_m для данного материала. Вал считается прочным, если $\sigma_{\text{экв}} \leq 0,7\sigma_m$.

Механические расчеты следует сделать после выполнения чертежей в тонких линиях, так как их результаты определяют окончательные размеры вала и подшипниковых узлов.

Перед началом расчета необходимо, если это однозначно не задано в задании, выбрать способ сопряжения двигателя с приводным механизмом. Обычно используется три вида передачи вращающего момента: упругой муфтой; ременной передачей; зубчатой передачей. Соответственно, на выходной конец вала устанавливается полумуфта, шкив или шестерня. При этом используется шпоночное соединение. Размеры шпонок и шпоночных пазов устанавливаются

ГОСТ 23360-78 в зависимости от диаметра выходного конца вала. Вал асинхронных машин обычно выполняется из стали марки 45 (ГОСТ 380-2005).

На вал двигателя действуют следующие радиальные силы:

$P_{\text{п}}$ – реакция передачи (радиальное усилие передачи);

$G_{\text{п}}$ – сила тяжести полумуфты, шкива или шестерни;

$G_{\text{р}}$ – сила тяжести ротора с валом;

T_{o} – сила одностороннего магнитного притяжения;

$R_A, R_{\text{в}}$ – реакции опор в подшипниках.

Как показали проведенные исследования, силой тяжести тормозного диска и вентилятора можно пренебречь.

На рисунке 3.16 для примера изображен вал электродвигателя, который имеет конструкцию, соответствующую машине, рассчитанной в четвертой главе.

Оевые размеры вала определяются по чертежу разработанного АД.

Диаметральные размеры вала определяются следующим образом. Диаметр выходного конца вала является одним из нормируемых присоединительных размеров машины и выбирается в зависимости от высоты ее оси вращения h (см. ниже табл. 3.21). Диаметр вала под подшипник d_2 определяется путем увеличения d_1 на величину, обеспечивающую буртик, достаточный для упора ступицы муфты или шкива, который будет устанавливаться на валу для сочленения АД с приводным механизмом. Обычно разница между d_1 и d_2 не превышает 10 мм, при этом d_2 должен быть выбран равным ближайшему стандартному внутреннему диаметру подшипника. Диаметр следующей ступени вала d_3 за подшипником выбирают таким, чтобы он был меньше внешнего диаметра внутреннего кольца подшипника.

При расчете вал рассматривается как ступенчатая балка, лежащая на двух опорах, причем расчет производится при наихудшем варианте распределения сил: $G_{\text{р}}$ и T_{o} совпадают по направлению, а $P_{\text{п}}$ направлена в другую сторону.

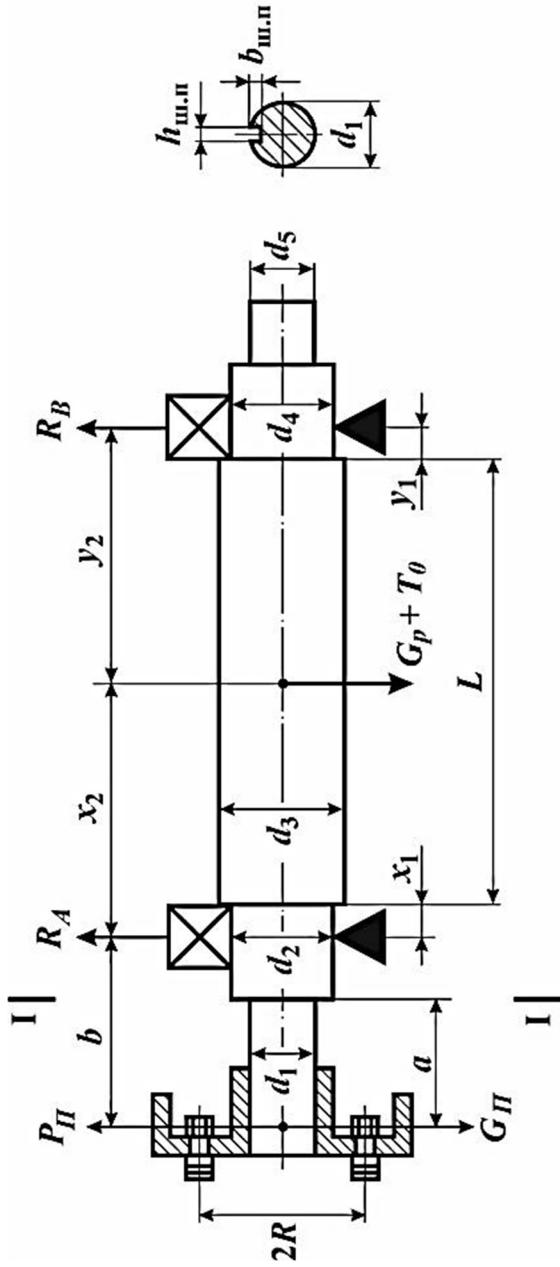


Рис. 3.16. Вал двигателя и действующие на него силы

Расчет вала на жесткость

Сила тяжести (вес) ротора с валом:

$$G_p = 64 \cdot D_2^2 \cdot l_2. \quad (3.134)$$

Реакция передачи:

$$P_n = k_n M_n / R, \quad (3.135)$$

где k_n – коэффициент, зависящий от способа сопряжения с приводимым механизмом; $M_n = 9550 \cdot P_2 / n$ – номинальный врачающий момент; R – радиус, на котором расположены элементы, передающие усилие: для полумуфты – радиус расположения пальцев муфты; для шкива – радиус окружности шкива; для шестерни – радиус делительной окружности.

При использовании упругой муфты $k_n = 0,3$; при клиноременной передаче $k_n = 1,8$; при плоскоременной передаче $k_n = 3$ при $n_n \leq 1000$ об/мин и $k_n = 5$ при $n_n \geq 1500$ об/мин и $P_2 \leq 20$ кВт; при зубчатой передаче $k_n = 1,09$.

Поскольку наиболее часто двигатель с приводимым механизмом соединяется упругой пальцевой муфтой, то в приложении П.4 приведены параметры таких муфт.

Прогиб вала под действием силы тяжести ротора:

$$f_G = \frac{G_p}{2EL^2} (y_2^2 S_1 + x_2^2 S_2), \quad (3.136)$$

где $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости материала вала; S_1 и S_2 – вспомогательные параметры:

$$S_1 = \sum_{i=1}^m \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{I_i}; \quad S_2 = \sum_{i=1}^m \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{I_i}. \quad (3.137)$$

Значения S_1 и S_2 определяются по табл. 3.19.

Таблица 3.19

Формуляр расчета вала на жесткость

Левая часть вала (между R_A и G_p)	d_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	I_i , $\text{м}^4 \cdot 10^6$	x_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	x^3_{i-1} , $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$x^3_i - x^3_{i-1}$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$(x^3_i - x^3_{i-1})/I_i$, м^{-1}	$S_1 =$
	d_2 d_3		x_1 x_2				
Правая часть вала (между R_B и G_p)	d_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	I_i , $\text{м}^4 \cdot 10^6$	y_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	y^3_{i-1} , $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$y^3_i - y^3_{i-1}$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$(y^3_i - y^3_{i-1})/I_i$, м^{-1}	$S_2 =$
	d_2 d_3			y_1 y_2			
Левая часть вала (между R_A и G_p)	d_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	I_i , $\text{м}^4 \cdot 10^6$	x_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	x^2_{i-1} , $\text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	$x^2_i - x^2_{i-1}$, $\text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	$(x^2_i - x^2_{i-1})/I_i$, м^{-2}	$S_0 =$
	d_2 d_3			x_1 x_2			

При заполнении табл. 3.19 и проведении необходимых расчетов размеры x_i и y_i представляют собой расстояние от соответствующей опоры до рассматриваемого сечения вала, а момент инерции i -го участка вала рассчитывается по формуле:

$$I_i = \frac{\pi \cdot d_i^4}{64}, \text{ м}^4, \quad (3.138)$$

где d_i – диаметр рассматриваемого участка вала, м.

Прогиб вала посередине сердечника ротора от реакции передачи:

$$f_n = \frac{P_{\Pi_B}}{3EL^2} [(1,5LS_0 - S_1)y_2 + x_2S_2], \quad (3.139)$$

где вспомогательный параметр S_0 определяется по табл. 3.19 как:

$$S_0 = \sum_{i=1}^m \frac{x_i^2 - x_{i-1}^2}{I_i}.$$

Начальный расчетный эксцентрикитет ротора, вызванный неточностью изготовления деталей двигателя и статическим прогибом от действия сил G_p и P_n :

$$e_0 = k\delta + f_G + f_n, \quad (3.140)$$

где $k = 0,15$ при $\delta < 0,5$ мм; $k = 0,1$ при $\delta > 0,5$ мм.

Начальная сила одностороннего магнитного притяжения, вызванная смещением ротора на e_0 :

$$T_0 = k' \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot e_0 \cdot 10^5 / \delta, \quad (3.141)$$

где $k' = 1,5$ при $2p > 2$, $k' = 1$ при $2p = 2$.

Прогиб вала под действием силы T_0 :

$$f_r = f_G \frac{T_0}{G_p}. \quad (3.142)$$

Прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения:

$$f_y = \frac{f_r}{1 - \frac{f_r}{e_0}}. \quad (3.143)$$

Результирующий прогиб вала:

$$T_0 = k' \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot e_0 \cdot 10^5 / \delta. \quad (3.144)$$

Допускается прогиб до 10% от величины воздушного зазора δ .

Определение критической частоты вращения

Прогиб вала от силы тяжести полумуфты:

$$f_m = f_n \frac{G_n}{P_n}, \quad (3.145)$$

где $G_n = 9,81m_n/2$ – сила тяжести полумуфты; m_n – масса муфты (см. приложение П.4).

Критическая частота вращения вала:

$$n_{kp} = 30 \sqrt{\frac{1 - f_T/f_0}{f_T + f_m}}. \quad (3.146)$$

Полученное значение n_{kp} должно удовлетворять неравенству:

$$n_{kp} > 1,3 \cdot n_h. \quad (3.147)$$

Расчет вала на прочность

Расчет вала на прочность проводится в наиболее опасном сечении I–I (рис. 3.16). Расчетный диаметр выходного конца вала:

$$d_0 = d_1 - b_{шп}, \quad (3.148)$$

где $b_{шп}$ – глубина шпоночного паза, которую можно выбрать по табл. 3.20.

Таблица 3.20

Глубина шпоночного паза

d_1 , мм	9	11	14	19...22	24...42	48	55...65	75
$b_{шп}$, мм	1,2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5

Изгибающий момент в сечении I–I:

$$M_u = k_m \cdot Z \cdot (P_n + G_n), \quad (3.149)$$

где Z – расстояние от середины кулачков муфты до сечения I–I, равное сумме длины L_n полумуфты и половины длины $l_{кул}$ (см. приложение П.4):

$$Z = L_n / 2 + l_{кул} / 2; \quad (3.150)$$

– k_m – кратность пускового момента.

Момент сопротивления при изгибе в сечении I–I:

$$W = 0,1 \cdot d_0^2. \quad (3.151)$$

Эквивалентное напряжение при совместном действии изгиба и кручения:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{W} \sqrt{M_n^2 + (k_m \cdot \alpha \cdot M_h)^2}, \quad (3.152)$$

где $\alpha = 0,6$ для нереверсивных двигателей (для реверсивных $\alpha = 0,8$).

Коэффициента запаса прочности:

$$k_{\text{зап.}i} = \sigma_m / \sigma_{\text{экв}}, \quad (3.153)$$

Величина коэффициента $k_{\text{зап.}i}$ должна удовлетворять условию $k_{\text{зап.}i} \geq 1,5$.

Расчет и выбор подшипников

Расчет подшипников заключается в выборе подшипников, обеспечивающих расчетный срок службы при заданной частоте вращения и расчетной динамической грузоподъемности. Последняя определяется по приведенной динамической нагрузке на подшипниках, так как в общем случае на него действует радиальная и аксиальная нагрузки. Выбор серии подшипника производится также с учетом диаметра вала под подшипник d_2 .

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник A со стороны выходного конца вала

$$R_A = P_n \frac{L+b}{L} + (G_n + T_0) \frac{x_2}{L}. \quad (3.154)$$

Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник B :

$$R_B = P_n \frac{b}{L} + (G_n + T_0) \frac{y_2}{L}. \quad (3.155)$$

Для дальнейшего расчета необходимо выбирать коэффициент нагрузки двигателя k_h , а также расчетный срок службы подшипников C_c . Величина коэффициента k_h зависит от характера нагрузки двигателя:

- при постоянной нагрузке $k_h = 1$;
- при нагрузке с умеренными толчками $k_h = 1,5$;
- при нагрузке со значительными толчками $k_h = 2$;
- при нагрузке с ударами и частыми сильными толчками $k_h = 3$.

Для машин общего назначения в большинстве случаев можно принять $k_h = 1,5\dots 2$.

Расчетный срок службы (или долговечность) подшипника может быть задан или его выбирают равным $C_c = (12\dots 18) \cdot 10^3$ ч.

Динамическая приведенная нагрузка на подшипник A :

$$Q_A = k_h \cdot R_A . \quad (3.156)$$

Динамическая приведенная нагрузка на подшипник B :

$$Q_B = k_h \cdot R_B . \quad (3.157)$$

Динамическая грузоподъемность подшипника A :

$$C_A = \frac{Q_A}{25,6} \sqrt[3]{C_c \cdot n} . \quad (3.158)$$

Динамическая грузоподъемность подшипника B :

$$C_B = \frac{Q_B}{18,5} (C_c \cdot n)^{0,3} . \quad (3.159)$$

Выбираем по приложениям П.5 – П.7 подшипники, у которых внутренний диаметр d равен диаметру шейки вала под подшипник $d = d_2$, допустимая частота вращения n не меньше заданного номинального значения, а динамическая грузоподъемность не меньше

рассчитанных значений. При этом, с целью унификации, в двигателях с высотами осей вращения $h < 160$ мм оба подшипника шариковые. При $h \geq 160$ мм подшипник со стороны выходного конца роликовый, а с другой стороны – шариковый средней серии. При $h \leq 132$ мм с обеих сторон применяются закрытые подшипники серии 180000, при этом подшипник B закрепляется плотно (фиксирующая опора), а подшипник A со стороны выходного конца вала – с возможностью аксиального перемещения («плавающая» опора).

3.5. Вопросы конструирования асинхронных электродвигателей

При разработке конструкции за основу рекомендуется взять заводской чертеж аналогичного по исполнению и мощности двигателя. Последовательность выполнения чертежа следующая. Сначала вычертываются активные части АД: изображается сердечник ротора (откладывается внутренний диаметр d_b , внешний диаметр D_2 и длина l_2), сердечник статора (внутренний диаметр D , внешний диаметр D_1 и длина l_1) и затем изображаются лобовые части обмоток статора. Для ротора изображаются к.з. кольца (шириной l_k и высотой h_k) и вентиляционные лопатки. Длину вентиляционной лопаткой $l_{\text{лоп}}$ принимают $l_{\text{лоп}} < l_{\text{выл1}}$, а число лопаток – в 2...3 раза меньше Z_2 .

Конструкция и размеры активных частей АД были определены в процессе электромагнитного расчета

После этого вычертывают станину, подшипниковые щиты и вентилятор.

Станина АД. Станина имеет продольные ребра, увеличивающие поверхность охлаждения. В двигателях со степенью защиты IP44 станины имеют прилитые лапы и приливы для размещения и крепления вводного устройства. Станины АД с высотой оси вращения 50...63 мм изготавливаются из алюминиевого сплава. Двигатели с высотой оси вращения 71...160 мм имеют станины из алюминиевого сплава или чугуна. Станины АД с вы-

сотами оси вращения 180 ...250 мм – чугунные. У АД с высотами оси вращения 250...355 мм станины могут быть как чугунные литые, так и стальные сварные.

Размеры станины вычисляются следующим образом.

1. Средняя толщина стенки станины:

$$h_{\text{стан}} = 2,5 + 0,025h,$$

где h – высота оси вращения двигателя.

2. Наружный диаметр станины:

$$D_{\text{стан}} = D_1 + 2h_{\text{стан}}.$$

3. Длина станины:

$$L_{\text{стан}} = L_1 + (1,5 \dots 2,0) L_{\text{выл.л.}}$$

4. Число ребер N_p :

$$N_p \approx 6,4\sqrt[3]{h}.$$

Полученное значение числа ребер N_p необходимо округлить до целого значения, кратного четырем.

5. Длина ребра L_p равна:

$$L_p \approx L_{\text{стан}} - (5 \dots 10) \text{ мм.}$$

6. Высота ребра h_p :

$$h_p = (0,15 \dots 0,25)h.$$

7. Средняя толщина ребра b_p :

$$b_p = (b_{\text{pb}} + b_{\text{po}})/2,$$

где b_{pb} и b_{po} – ширина верхней части и основания ребра:

$$b_{\text{pb}} = 2r_p;$$

r_p – радиус верхней части ребра ($r_p = 1,0$ мм при $h = 56$ и 63 мм; $r_p = 1,5$ мм при $h = 71 \dots 132$ мм; $r_p = 2,5$ при $h = 160 \dots 250$ мм; $r_p = 3 \dots 4,5$ мм при $h > 250$ мм).

8. Минимально допустимое расстояние от нижней точки станины до опорной поверхности лап:

$$h_{\min} \approx 3 + (0,015 \dots 0,02)b.$$

Для каждой высоты оси вращения предусмотрено не более двух станин с лапами, отличающихся только длиной, и соответственно двух станин без лап. Станины АД с высотами оси вращения 50...250 мм имеют внешние замковые поверхности, с высотами оси вращения 280...355 мм – внутренние.

Подшипниковые щиты предназначены для: крепления подшипников; закрепления и координации ротора в радиальном и аксиальном направлениях относительно корпуса и пакета статора; защиты внутренней полости электродвигателя от внешнего механического воздействия и попадания внутрь двигателя посторонних предметов, пыли и влаги; защиты персонала от прикосновения к токоведущим и вращающимся частям машины; отвода тепла. По конструкции они делятся на два вида: щиты для машин на лапах и фланцевые щиты для машин без лап (или с лапами), которые служат не только для крепления подшипников, но и для установки и крепления машины на исполнительном механизме. Щит должен иметь жесткую конструкцию, точные, качественно выполненные координирующие элементы, развитую, эстетичную внешнюю поверхность, так как от этого зависит долговечность подшипников, некоторые энергетические показатели электрической машины, ее внешний вид. При этом длина щита выбирается минимальной для большей технологичности отливки и жесткости. Расстояние от элементов щита до лопаток ротора выбирается не более 5...7 мм.

Замковое соединение предпочтительно наружное, когда на подшипниковом щите делается внутренняя заточка (расточка). В этом случае при механической обработке станины исключается возможность повреждения лобовых частей обмотки.

Подшипниковые щиты АД с высотами оси вращения 50...80 мм выполняются из алюминиевого сплава с ребрами охлаждения на наружной поверхности, которые при сборке совпадают с ребрами станины. В таких щитах отверстия под подшипник армированы (укреплены) стальной втулкой. Подшипниковые щиты АД с высотами оси вращения 80...250 мм выполнены из чугуна, щиты АД с высотами оси вращения 200...250 мм имеют внутреннее оребрение. Подшипниковые щиты соединены со станиной замковым соединением и крепятся к ней винтами. Расстояние от внутренней поверхности щита до лобовых частей обмотки статора составляет обычно 15...20 мм.

Выбор основных размеров подшипникового щита проводится по размерам станины, подшипников и технологическим соображениям, определявшим минимальные толщины литья. На щите со стороны, противоположной замкам, необходимо предусмотреть технологические приливы, расположенные под углом 120° относительно друг друга для радиального зажима в самоцентрирующем патроне.

Конструкции подшипниковых узлов. В двигателях основного исполнения с высотами оси вращения 50...132 мм установлены шарикоподшипники типа 180000 с двусторонним уплотнением (рис. 3.17, а). Смазка, рассчитанная на весь срок службы, закладывается в них при изготовлении подшипника. Такие подшипники упрощают конструкцию машин и не требуют пополнения смазки в эксплуатации, что уменьшает трудозатраты на обслуживание двигателя. Подшипниковые крышки в этих двигателях отсутствуют.

Двигатели больших высот оси вращения имеют подшипниковые узлы с открытыми подшипниками (рис. 3.17, б, в), смазка в которых удерживается при помощи подшипниковых крышек.

В АД применяют подшипники качения средней серии. В АД основного исполнения применяют бесконтактное щелевое уплотнение, уплотняющее действие которого усилено двумя концентрическими жировыми канавками.

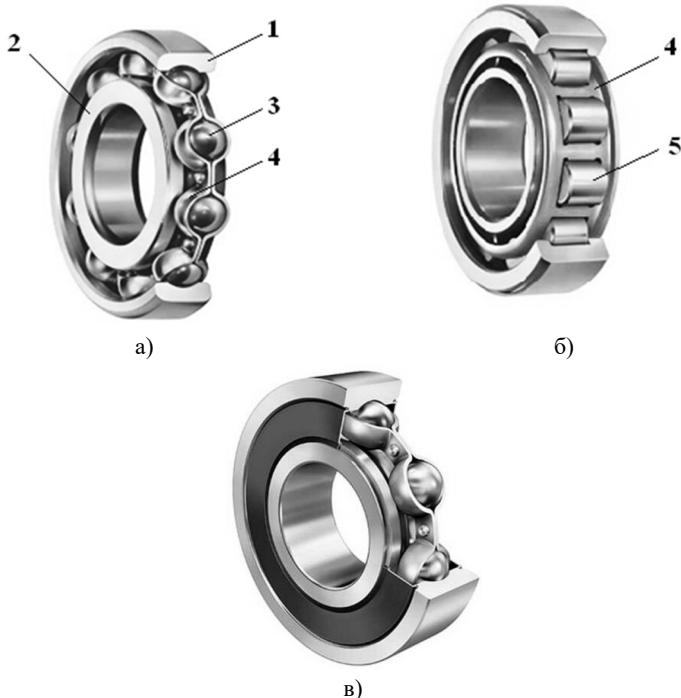


Рис. 3.17. Закрытый (а) и открытые шариковый (б)

и роликовый (в) подшипники качения:

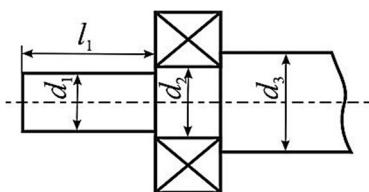
1, 2 – наружное и внутреннее кольца; 3 – шарик;
4 – сепаратор; 5 – ролик; 6 – защитная шайба

Вал ротора асинхронного двигателя является ответственной деталью любой электрической машины. От жёсткости вала и точности его обработки зависит равномерность воздушного зазора между статором и ротором. Вал имеет ступенчатую форму (рис. 3.16). Отношение диаметров соседних ступеней не должно превышать 1,3. При этом размеры выходного конца вала (диаметр d_1 и длины l_1) должны соответствовать ГОСТ 18709-73 и ГОСТ 20839-75. Выбор указанных размеров вала рекомендуется осуществлять по табл. 3.21.

Таблица 3.21

Рекомендуемые размеры вала со стороны выходного конца

h , мм	63	71	80	90	100	112	132	160	180	200	225	250	280	315	355
l_1 , мм	30	40	50	50	60	80	80	110	110	140	140	140	170	170	210
d_1 , мм	14	19	22	24	28	32	38	48	55	60	65	75	80	90	100
d_2 , мм	15	20	25	25	30	35	45	50	60	65	70	85	85	95	110
d_3 , мм	20	27	30	32	37	43	54	60	70	75	80	100	100	110	125



Вводное устройство. Для подключения АД к сети служит вводное устройство, расположенное на верху станины в АД с высотами оси вращения 50...250 мм и сбоку в АД больших высот. Устройство допускает присоединение к АД гибкого металлического рукава и кабелей с медными или алюминиевыми жилами, с резиновой или пластмассовой оболочкой. Двигатели мощностью 30 кВт и выше при напряжении 220 В, а также АД с высотами оси вращения 50...53 мм допускают присоединение кабелей только с медными жилами. Ввод кабеля производят через один или два штуцера, а также через удлинитель под сухую разделку или заливку кабельной массой.

Конструкция вводного устройства позволяет разворачивать его корпус с фиксацией на 180° , при этом панель вместе с закрепленными на ней выводными концами обмотки статора остается неподвижной.

Внутри вводного устройства или снаружи на станине предусмотрена заземляющий болт для подключения заземления или оболочки кабеля.

Поскольку подробный механический расчет всех деталей АД не проводится, то размеры отдельных конструктивных деталей и узлов принимается приближенно на основе размерных соотношений чертежа, принятого за базу при конструировании. Установочные, габаритные и присоединительные размеры двигателя должны соответствовать ГОСТ.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Чем различаются технические и экономические требования, предъявляемые к электрическим машинам?
2. Перечислите основные принципы, заложенные в методах электромагнитного расчёта.
3. Как производится выбор базовой модели АД и основных электротехнических материалов?
4. Каковы критерии выбора A , B_δ и α_δ и их влияние на параметры ЭМ?
5. Как производится выбор и расчёт главных размеров АД?
6. Чем определяется число проводников в пазу статора?
7. Как выбирают число зубцов Z_1 и число параллельных ветвей обмотки статора?
8. Чем различаются разные типы обмоток статора?
9. Как влияет выбор плотности тока в проводниках статора на основные эксплуатационные показатели машины?
10. Как проводится расчет обмоточных данных статора АД при использовании круглых проводов?
11. Как проводится расчет геометрии зубцово-пазовой зоны статора при использовании круглых проводов?
12. Почему в статорах со всыпной обмоткой выполняют зубцы с параллельными стенками? Зависит ли допустимое значение индукции в зубце от его конфигурации?
13. Как осуществляется выбор формы пазов КЗ ротора?
14. Как проводится расчет обмотки и магнитопровода КЗ ротора?
15. Как проводится расчет магнитной цепи и намагничающего тока АД?

16. В чём заключаются принципы расчёта активных и индуктивных сопротивлений АД?
17. Какие участки магнитной цепи создают наибольшее падение магнитного потенциала?
18. Как влияет геометрия и обмоточные данные АД на параметры схемы замещения?
19. Как и на какие параметры схемы замещения влияет изменение скольжения?
20. Как влияет насыщение стали и вытеснения тока ротора на параметры схемы замещения?
21. Какие потери мощности существуют в АД? Как их рассчитывают?
22. Как проводится расчёт рабочих характеристик по схеме замещения АД?
23. Какие параметры характеризуют пусковые свойства АД? Как рассчитывают пусковые характеристики?
24. Как производится оценка работоспособности спроектированной машины?

Глава 4

РАСЧЕТ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

В данной главе рассмотрен расчет трехфазного асинхронного электродвигателя средней мощности общего назначения закрытого исполнения на напряжение до 1000 В, поскольку именно такие машины имеют наиболее широкое применение в промышленности. Расчет проведем по методике, приведенной в главе 3. В качестве примера выполним расчет конкретного электродвигателя, имеющего следующие исходные данные:

- номинальная мощность $P_2 = 0,75 \text{ кВт}$;
- номинальное напряжение $U_{\text{n}} = 220/380 \text{ В}$;
- номинальная частота питающей сети $f = 50 \text{ Гц}$;
- высота оси вращения $h = 80 \text{ мм}$;
- число полюсов $2p = 6$;
- коэффициент полезного действия $\eta = 0,7$;
- коэффициент мощности $\cos\phi = 0,74$;
- кратность пускового момента не менее $M_{\text{n}} / M_{\text{h}} = 2,0$;
- перегрузочная способность не менее $M_m / M_{\text{h}} = 2,2$;
- кратность пускового тока не более $I_{\text{n}} / I_{\text{h}} = 4,0$;
- режим работы – длительный S1;
- исполнение по степени защиты – закрытое обдуваемое IP44;
- исполнение по способу охлаждения IC0141;
- конструктивное исполнение по способу монтажа IM1001;
- климатическое исполнение и категория размещения У3.

4.1. Главные размеры машины

В общем случае расчет главных размеров начинается с выбора по заданной высоте оси вращения h наружного диаметра статора D_1 . Затем вычисляем D и l . Критерием правильности определения D и l служит конструктивный фактор – отношение $\lambda = l/\tau$.

Обозначения геометрических размеров показаны на рис. 3.1.

1. Наружный диаметр статора D_1 определяется в зависимости от коэффициента: $k_h = 1 - \frac{D_1}{2h}$.

Для проектируемой машины $k_h = 0,18$ (см. табл. 3.4). Тогда по (3.1):

$$D_1 = 2h(1 - k_h) = 2 \cdot 80 \cdot (1 - 0,18) = 131,2 \text{ мм.}$$

Принимаем $D_1 = 131$ мм.

2. Внутренний диаметр статора D определяется по коэффициенту $k_D = D/D_1$. Для проектируемой машины выбираем $k_D = 0,67$ (табл. 3.5).

$$D = k_D D_1 = 0,67 \cdot 131 = 87,8 \text{ мм. Принимаем } D = 88 \text{ мм.}$$

3. Число полюсов по заданию $2p = 6$. Тогда число пар полюсов $p = 3$ и синхронная частота вращения:

$$n = f/p = 50/3 = 16,67 \text{ об/с.}$$

4. Полюсное деление $\tau = \pi D/2p = \pi \cdot 88/6 = 46,1 \text{ мм.}$

5. Коэффициент падения напряжения на первичной обмотке по (3.5):

$$k_E = 0,98 - p / 200.$$

Для проектируемой машины $k_E = 0,935$.

6. Расчетная мощность по (3.6):

$$P' = \frac{k_E P_2}{\eta \cos \varphi} = \frac{0,935 \cdot 750}{0,7 \cdot 0,74} = 1353 \text{ ВА.}$$

7. Индукция в воздушном зазоре. При $D \leq 225$ мм:

$$B_\delta = B + D_1/1800, \text{ где } B = 0,75 \text{ для } 2p = 6.$$

Тогда $B_\delta = 0,75 + 131/1800 = 0,86 \text{ Тл.}$

8. Линейная нагрузка. При $D_1 = 131$ мм:

$$A = 0,1D_1 + (5\dots 10) = 0,1 \cdot 131 + 10 = 23,1 \text{ А/мм.}$$

9. Коэффициент формы кривой поля k_b , расчетный коэффициент полюсного перекрытия α_1 и коэффициент насыщения зубцов k_z принимаем в зависимости от ожидаемого насыщения зубцов по табл. 3.7 с учетом рекомендаций, приведенных в соответствующем пункте третьей главы. На данном этапе принимаем $k_b = 1,1$; $\alpha_1 = 0,66$; $k_z = 1,1$.

10. Обмоточный коэффициент для однослойной обмотки предварительно принимаем $k_o = 0,96$.

11. Расчетная длина сердечника статора по (3.7):

$$\begin{aligned} l &= \frac{10^6 P'}{\pi^2 k_b k_o \alpha_1 \cdot AB_o D^2 n} = \\ &= \frac{1353 \cdot 10^6}{\pi^2 1,1 \cdot 0,96 \cdot 0,66 \cdot 23,1 \cdot 0,85 \cdot 88^2 \cdot 16,67} = 78,01 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Принимаем $l = 78$ мм.

Действительная длина сердечника равна расчетной, так как в машине нет радиальных каналов.

12. Конструктивный фактор:

$$\lambda = l / \tau = 78 / 46,1 = 1,69.$$

Эта величина λ допустима, так как для $2p = 6$ лежит в диапазоне $\lambda = 0,7 \dots 2,2$.

4.2. Обмотка и пазы статора

При $h \leq 160$ на статоре выполняют однослойную концентрическую обмотку с целым числом пазов на полюс и фазу q .

13. Число пазов по (3.8):

$$Z_1 = 2pmq = 6 \cdot 3 \cdot 2 = 36,$$

где $q = 3$ (выбираем по табл. 3.8).

14. Шаг обмотки по пазам по (3.9):

$$y = \beta \frac{Z_1}{2p} = 1 \frac{36}{6} = 6,$$

где $\beta = 1$ – относительное укорочение шага для однослойной обмотки.

15. Коэффициент укорочения по (3.11):

$$k_y = \sin \frac{\pi}{2} \beta = \sin \frac{\pi}{2} 1 = 1.$$

16. Коэффициент распределения по (3.12):

$$k_p = \frac{\sin q \frac{\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} = \frac{\sin 2 \frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 2}}{2 \sin \frac{\pi}{2 \cdot 3 \cdot 2}} = 0,966, \text{ где } \alpha = \frac{\pi}{mq}.$$

17. Обмоточный коэффициент по (3.13):

$$k_o = k_y \cdot k_p = 1 \cdot 0,966 = 0,966.$$

18. Номинальный ток фазы статора по (3.14):

$$I_{1n} = \frac{P_2}{m_i U_1 \cos \phi} = \frac{750}{3 \cdot 220 \cdot 0,7 \cdot 0,74} = 2,16 \text{ A.}$$

19. Число эффективных проводников в пазу по (3.15):

$$N_n = \frac{\pi \cdot DA a_1}{I_{1n} Z_1} = \frac{\pi \cdot 88 \cdot 23,1 \cdot 1}{2,16 \cdot 36} = 82,1,$$

где a_1 – число параллельных ветвей в обмотке одной фазы.

В АД с $h \leq 132$ мм обычно $a_1 = 1$. Принимаем $N_n = 82$.

20. Число витков в фазе обмотки статора по (3.16):

$$W_1 = \frac{N_n Z_1}{2a_1 m} = \frac{82 \cdot 36}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 492.$$

21. Магнитный поток по (3.17):

$$\Phi = \frac{k_E U_1}{4k_B k_o W_1 f} = \frac{0,935 \cdot 220}{4 \cdot 1,1 \cdot 0,96 \cdot 492 \cdot 50} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ В6.}$$

22. Индукция в зазоре по (3.18):

$$B_\delta = \frac{\Phi \cdot 10^6}{a_1 \cdot \tau \cdot l} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{0,66 \cdot 46,1 \cdot 78} = 0,855 \text{ Тл.}$$

Значение B_δ практически не отличается от выбранного в п.7.

23. Уточняем линейную нагрузку по (3.19):

$$A = \frac{2 \cdot I_{lh} W_1 m_1}{\pi D} = \frac{2 \cdot 2,16 \cdot 492 \cdot 3}{\pi \cdot 88} = 23,06 \text{ А/мм.}$$

Значение A также практически не отличается от выбранного в п. 8.

24. Паз статора – трапециoidalный (рис. 3.3). При этом зубцы имеют параллельные стенки и $b_{z1} = \text{const}$. Принимаем предварительно допустимые индукции в зубцах и спинке статора в зависимости от $2p$ (табл. 3.9):

$$B_{z1} = 1,7 \text{ Тл; } B_{c1} = 1,6 \text{ Тл.}$$

25. Зубцовое деление статора по (3.20):

$$t_1 = \pi D / Z_1 = \pi \cdot 88 / 36 = 7,7 \text{ мм.}$$

26. Ширина зубца статора по (3.21):

$$b_{z1} = \frac{B_\delta t_1 l}{B_{z1} l_1 k_c} = \frac{0,768 \cdot 7,7 \cdot 78}{1,7 \cdot 78 \cdot 0,97} = 4,0 \text{ мм.}$$

Коэффициент заполнения пакета сталью k_c для оксидированных листов толщиной 0,5 мм принимаем 0,97 (при $h \leq 250$ мм).

27. Высота спинки статора по (3.22):

$$h_{\text{cl}} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2B_{\text{cl}} l_1 k_{\text{c}}} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 1,6 \cdot 78 \cdot 0,97} = 8,1 \text{ мм.}$$

28. Размеры паза статора в штампе по (3.23):

$$h_{\text{nl}} = (D_1 - D)/2 - h_{\text{c}} = (131 - 88)/2 - 8,1 = 13,4 \text{ мм};$$

$$b_1 = \pi(D + 2h_{\text{nl}})/Z_1 - b_{z1} = \pi(88 + 2 \cdot 13,4)/36 - 4 = 6,0 \text{ мм};$$

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{\text{nl}}) - Z_1 b_{z1}}{Z_1 - \pi} = \frac{\pi(88 + 2 \cdot 0,5) - 36 \cdot 4}{36 - \pi} = 4,0 \text{ мм};$$

$$h_1 = h_{\text{nl}} - (b_2 - b_{\text{m}})/2 = 13,4 - 0,5 - (4,0 - 2,5)/2 = 12,2 \text{ мм.}$$

Высоту шлифа $h_{\text{ш1}}$ при $h \leq 132$ мм принимают $h_{\text{ш1}} = 0,5$.

Ширина шлифа $b_{\text{ш1}}$ должна обеспечить возможность укладки проводников обмотки статора в паз. В сериях АД величина $b_{\text{ш1}}$ нормализуется и при $h = 80$ мм выбирается равной $b_{\text{ш1}} = 2,5$ мм.

29. Размер паза в свету по (3.24):

$$b'_1 = b_1 - \Delta_{\text{c}} = 6,0 - 0,1 = 5,9 \text{ мм};$$

$$b'_2 = b_2 - \Delta_{\text{c}} = 4,0 - 0,1 = 3,9 \text{ мм};$$

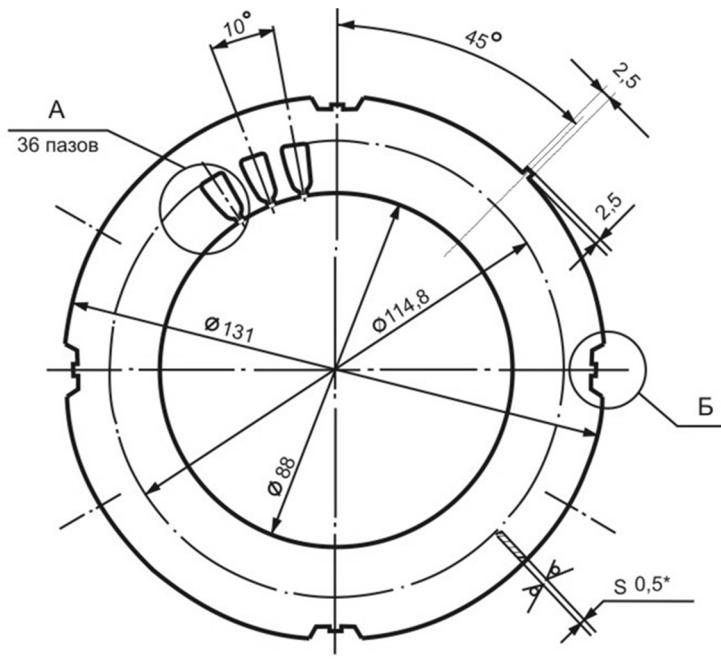
$$h'_{\text{nl}} = h_{\text{nl}} - \Delta_{\text{c}} = 12,2 - 0,1 = 12,1 \text{ мм},$$

где Δ_{c} – припуск на сборку. При $h \leq 132$ мм выбираем $\Delta_{\text{c}} = 0,1$ мм.

30. Площадь паза в свету по (3.25)

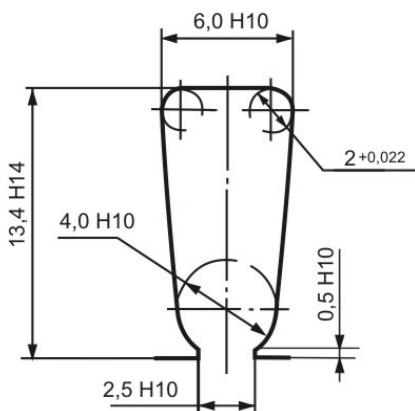
$$S_{\text{n}} = 0,5(b'_1 + b'_2)h_1 = 0,5(5,9 + 3,9) \cdot 12,1 = 59,23 \text{ мм}^2.$$

Чертеж рассчитанного листа статора показан на рис. 4.1.



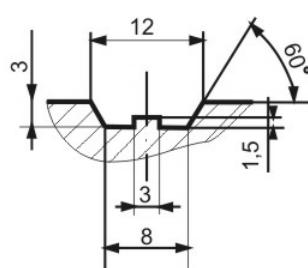
a)

A (5:1)



б)

Б(2:1)



в)

Рис. 4.1. Лист (а), паз (б) и выемка для сварочного шва (в) пакета статора

31. Площадь изоляции.

Для проектируемого двигателя выбираем класс изоляции В.

Для полуузакрытых пазов выбираем лавсановую пленку ПЭТФ. Толщина изоляции $b_{из1}/b_{из2} = 0,2 / 0,3$ мм для $h = 50 \dots 80$ мм (табл. 3.11).

$$S_{из} = b_{из1} (2h'_{п1} + b'_1 + 0,5\pi b'_2 - b_{из1}) + b_{из2} 0,5b'_2 = \\ = 0,2(2 \cdot 12,1 + 5,9 + 0,5 \cdot \pi \cdot 3,9 - 2,5) + 0,3 \cdot 0,5 \cdot 3,9 = 7,33 \text{ мм}^2.$$

32. Площадь изолированного паза по (3.27):

$$S_{ни} = S_{п} - S_{из} = 59,23 - 7,33 = 51,9 \text{ мм}^2.$$

33. Диаметр проводника определяется по (3.28) из допустимого коэффициента заполнения паза $k_3 \leq 0,72$ для машинной укладки обмотки:

$$d_{из} = \sqrt{\frac{k_3 S_{ни}}{N_{п} n_{эп}}} = \sqrt{\frac{0,72 \cdot 51,9}{82 \cdot 1}} = 0,675 \text{ мм.}$$

Принимаем провод марки ПЭТВ с эмалевой изоляцией класса В.

Выбираем ближайший стандартный провод, имеющий диаметры $d_{из}/d = 0,675/0,62$ мм, площадь проводника $q_{пр} = 0,302 \text{ мм}^2$ (см. табл. П.1).

Плотность тока по (3.29):

$$J_1 = \frac{I_{lh}}{a_1 \cdot n_{эп} \cdot q_{пр}} = \frac{2,16}{1 \cdot 1 \cdot 0,302} = 7,2 \text{ А/мм}^2.$$

Величину J_1 сравниваем с рекомендуемым значением $J_{1\text{доп}}$ по рис. 3.4: при $D_1 = 131$ мм получаем, что $J_{1\text{доп}} = 7,0 \dots 9,0 \text{ А/мм}^2$, т.е. полученное расчетное значение плотности тока удовлетворяет этим требованиям.

4.3. Воздушный зазор. Ротор

34. Воздушный зазор для $2p = 6$:

$$\delta = 0,002 \cdot D_1 = 0,002 \cdot 131 = 0,262 \text{ мм.}$$

Принимаем $\delta = 0,25 \text{ мм.}$

35. Внешний диаметр ротора по (3.30):

$$D_2 = D - 2\delta = 88 - 2 \cdot 0,25 = 87,5 \text{ мм.}$$

36. Длина ротора $l_2 = l_1 = 78 \text{ мм.}$

37. Форма и число пазов ротора. При $h \leq 355 \text{ мм}$ обмотка ротора литая алюминиевая. Одновременно со стержнями отливаются к.з. кольца и вентиляционные лопатки. При $h \leq 132 \text{ мм}$ в роторе применяются овальные полуузакрытые пазы (рис. 3.5). При $h \leq 100 \text{ мм}$ выбираем следующие размеры шлица: $h_{ш2} = 0,5 \text{ мм}$ и $b_{ш2} = 1,0 \text{ мм.}$

Число пазов ротора выбираем с учетом высоты оси вращения и числа пазов статора: $Z_1/Z_2 = 36/28$. Исходя из минимума паразитных моментов, принимаем скос пазов роторов на 1 зубцовое деление статора $t_{ck} = t_1$.

38. Зубцовое деление ротора по (3.31):

$$t_2 = \pi \cdot D_2 / Z_2 = \pi \cdot 87,5 / 28 = 9,8 \text{ мм.}$$

39. Внутренний диаметр сердечника ротора.

Сердечник ротора насаживается непосредственно на вал, поэтому его внутренний диаметр равен наружному диаметру вала по (3.32):

$$d_{\text{в}} = k_{\text{в}} D_1 = 0,23 \cdot 131 = 30 \text{ мм,}$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент вала, который при $h = 71 \dots 355 \text{ мм}$ равен $k_{\text{в}} = 0,23$.

40. Ток в стержне ротора по (3.33):

$$I_2 = k_1 I_1 \frac{2m_1 W_1 k_o}{Z_2} = 0,78 \cdot 2,16 \frac{2 \cdot 3 \cdot 492 \cdot 0,966}{28} = 170 \text{ А.}$$

Здесь $k_1 = I_2 / I_1 \approx \cos \varphi + 0,04 = 0,74 + 0,04 = 0,78$.

41. Ширина зубца ротора. Принимаем по табл. 3.9 предварительно допустимые индукции в зубцах и спинке ротора: $B_{z2} = 1,8$ Тл, $B_{c2} = 0,95$ Тл. Тогда по (3.34):

$$b_{z2} = \frac{B_{\delta} t_2 l}{B_{z2} l_2 k_c} = \frac{0,855 \cdot 9,8 \cdot 78}{1,8 \cdot 78 \cdot 0,97} = 4,8 \text{ мм.}$$

42. Расчетная высота спинки ротора по (3.35):

$$h_{c2p} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2l_2 k_c B_{c2}} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 78 \cdot 0,97 \cdot 0,95} = 13,6 \text{ мм.}$$

43. Высота паза ротора по (3.36):

$$h_{n2} = 0,5(D_2 - k \cdot d_e) - h_{c2p} = 0,5(87,5 - 1 \cdot 30) - 13,6 = 15,1 \text{ мм.}$$

44. Размеры паза. Принимаем следующие размеры шлица: $h_{ш2} = 0,5$ мм, $b_{ш2} = 1$ мм. Тогда наибольшая и наименьшая ширина паза будут равны:

$$d_2 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{ш2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 + \pi} \pi = \frac{\pi(87,5 - 2 \cdot 0,5) - 28 \cdot 4,8}{28 + \pi} = 4,3 \text{ мм;}$$

$$d_1 = \frac{\pi(D_2 - 2h_{ш2}) - Z_2 b_{z2}}{Z_2 - \pi} \pi = \frac{\pi(87,5 - 2 \cdot 15,1) - 28 \cdot 4,8}{28 - \pi} = 1,7 \text{ мм.}$$

Для качественной заливки ротора, а также по условиям прочности штампа должно быть $d_1 \geq 1,5 \div 2$ мм при $h \leq 132$ мм, что выполняется.

Высота между центрами окружностей паза по (3.37):

$$h_l = h_{n2} - h_{ш2} - 0,5(d_2 + d_1) = 15,1 - 0,5 - 0,5(4,8 + 1,7) = 11,6 \text{ мм.}$$

45. Действительная высота спинки статора по (3.38):

$$h_{c2} = 0,5(D_2 - d_b) - h_{n2} = 0,5(87,5 - 30) - 15,1 = 13,6 \text{ мм.}$$

По условиям механической прочности должно быть $h_{c2} \geq 4$ мм.

46. Поперечное сечение стержня, равное площади паза ротора по (3.39):

$$\begin{aligned}q_c = q_{n2} &= \frac{\pi}{8} (d_2^2 + d_1^2) + 0,5(d_2 + d_1)h_1 = \\&= \frac{\pi}{8} (4,3^2 + 1,7^2) + 0,5(4,3 + 1,7)11,6 = 43,2 \text{ мм}^2.\end{aligned}$$

47. Плотность тока в стержне ротора по (3.40):

$$J_c = I_2 / q_c = 170 / 43,2 = 3,9 \text{ А/мм}^2.$$

Для машин закрытого обдуваемого исполнения данная плотность тока допустима (допускается $J_c = 2,5 \dots 4 \text{ А/мм}^2$).

48. Коэффициент приведения тока кольца к стержню по (3.41):

$$\Delta = 2 \sin(\pi p / Z_2) = 2 \sin(\pi \cdot 3 / 28) = 0,66.$$

49. Ток короткозамыкающего кольца по (3.42):

$$I_k = I_2 / \Delta = 170 / 0,66 = 257,6 \text{ А.}$$

50. Сечение короткозамыкающего кольца по (3.43):

$$q_k = I_k / J_k = 257,6 / 3,28 = 78,4 \text{ мм}^2.$$

Допустимая плотность тока в кольце выбирается равной $J_k = 2,0 \dots 3,6 \text{ А/мм}^2$.

Высота кольца $h_k = (1,1 \dots 1,25) h_{n2} = 1,15 \cdot 15,1 = 17,4 \text{ мм.}$

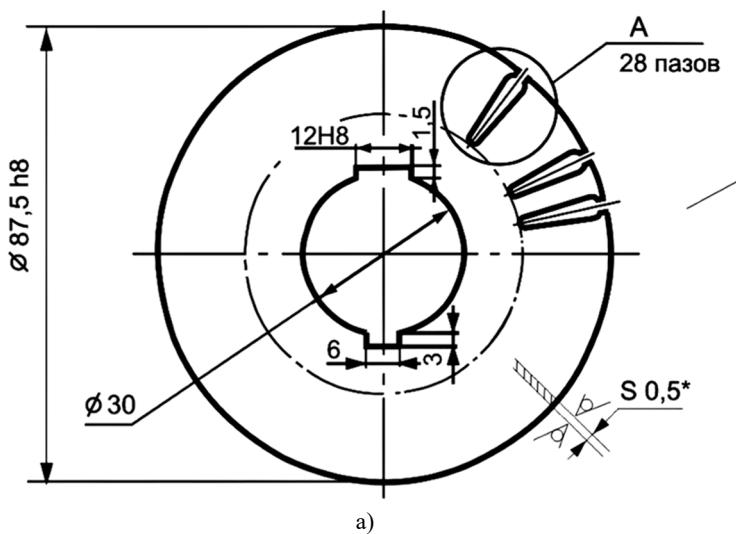
Ширина кольца $l_k = q_k / h_k = 78,4 / 17,4 = 4,5 \text{ мм.}$

Окончательно площадь сечения к.з. кольца по (3.44):

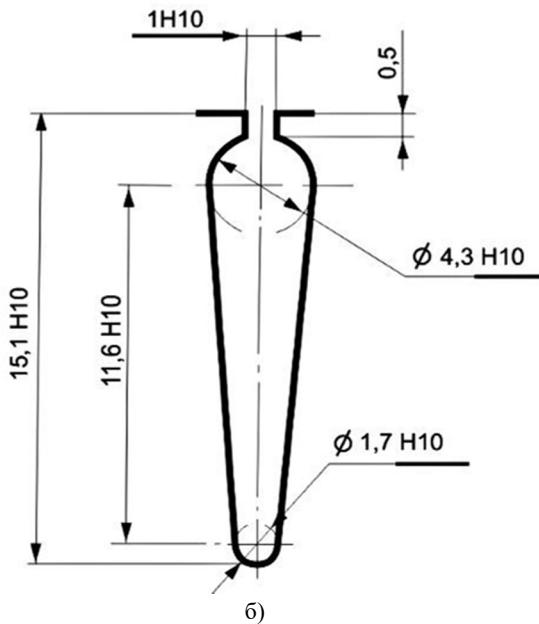
$$q_k = h_k l_k = 17,4 \cdot 4,5 = 78,3 \text{ мм.}$$

Чертеж рассчитанного листа ротора показан на рис. 4.2.

Общий вид спроектированного ротора показан на рис. 4.3.



a)



b)

Рис. 4.2. Лист (а) и паз (б) ротора

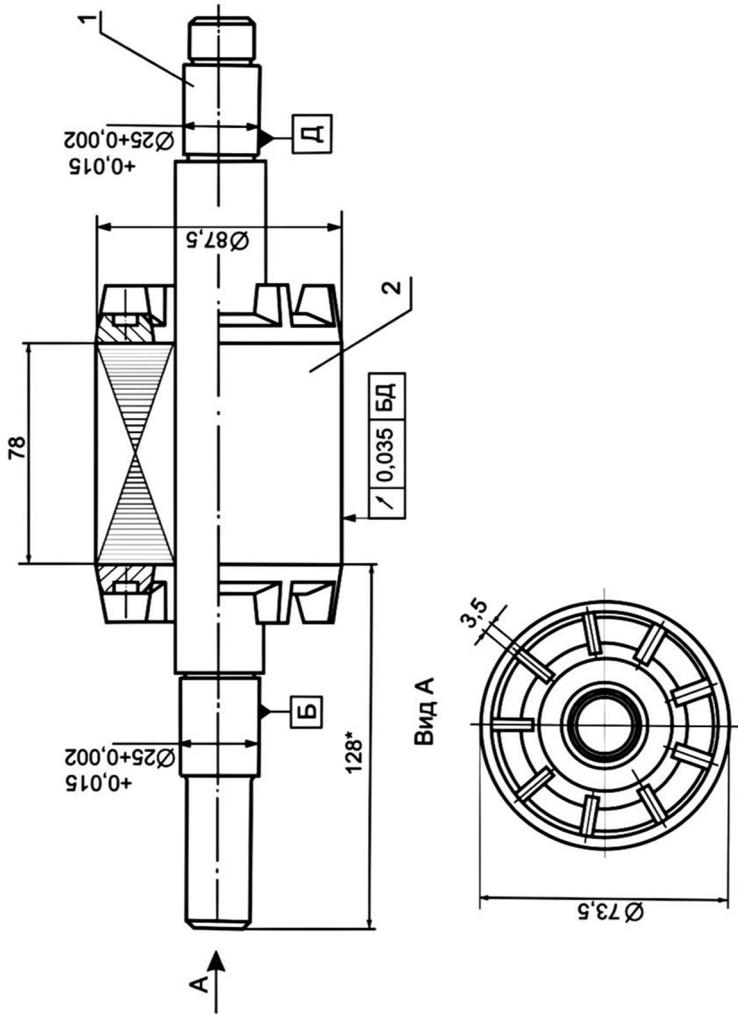


Рис. 4.3. Общий вид ротора

4.4. Расчет магнитной цепи

51. Индукция в отдельных участках магнитной цепи по (3.45):

$$B_{z1} = \frac{B_0 t_1 l}{b_{z1} l_1 k_c} = \frac{0,855 \cdot 7,7 \cdot 78}{4,0 \cdot 78 \cdot 0,97} = 1,7 \text{ Тл};$$

$$B_{z2} = \frac{B_0 t_2 l}{b_{z2} l_2 k_c} = \frac{0,855 \cdot 9,8 \cdot 78}{4,8 \cdot 78 \cdot 0,97} = 1,8 \text{ Тл};$$

$$B_{cl} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2h_{cl} l_1 k_c} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 8,1 \cdot 78 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ Тл};$$

$$B_{c2} = \frac{\Phi \cdot 10^6}{2h_{c2} l_2 k_c} = \frac{1,96 \cdot 10^{-3} \cdot 10^6}{2 \cdot 13,6 \cdot 78 \cdot 0,97} = 0,95 \text{ Тл}.$$

52. Коэффициент воздушного зазора (коэффициент Картера) по (3.46):

$$k_{\delta1} = \frac{t_1}{t_1 - \gamma_1 \delta} = \frac{7,7}{7,7 - 6,67 \cdot 0,25} = 1,23;$$

$$k_{\delta2} = \frac{t_2}{t_2 - \gamma_2 \delta} = \frac{9,8}{9,8 - 1,78 \cdot 0,25} = 1,04;$$

$$k_{\delta} = k_{\delta1} k_{\delta2} = 1,23 \cdot 1,04 = 1,28;$$

$$\gamma_1 = \frac{4}{\pi} \left(\frac{b_{m1}}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{b_{m1}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{m1}}{2\delta} \right)^2} \right) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \left(\frac{2,5}{2 \cdot 0,25} \operatorname{arctg} \frac{2,5}{2 \cdot 0,25} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{2,5}{2 \cdot 0,25} \right)^2} \right) = 6,67;$$

$$\gamma_2 = \frac{4}{\pi} \left(\frac{b_{m2}}{2\delta} \operatorname{arctg} \frac{b_{m2}}{2\delta} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{b_{m2}}{2\delta} \right)^2} \right) =$$

$$= \frac{4}{\pi} \left(\frac{1}{2 \cdot 0,25} \operatorname{arctg} \frac{1}{2 \cdot 0,25} - \ln \sqrt{1 + \left(\frac{1,0}{2 \cdot 0,25} \right)^2} \right) = 1,78.$$

53. Намагничающая сила воздушного зазора по (3.47):

$$F_{\delta} = 10^{-3} \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \delta \cdot k_{\delta} = \frac{10^{-3}}{\mu_0} 0,855 \cdot 0,25 \cdot 1,28 = 217,7 \text{ A.}$$

Здесь $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная проницаемость воздуха.

54. Напряженности магнитного поля и намагничающие силы стальных участков. Для сердечников статора и ротора выбрали сталь марки 2013*, кривая намагничивания ее приведена в Приложении в табл. П.2. По первой таблице этого приложения определяем, что значению индукции в зубцах статора $B_{z1} = 1,7$ Тл соответствует напряженность магнитного поля $H_{z1} = 1,15$ А/мм, а значению индукции в зубцах ротора $B_{z2} = 1,8$ Тл соответствует напряженность магнитного поля $H_{z2} = 1,52$ А/мм. Тогда МДС зубцов статора и ротора соответственно равны:

$$F_{z1} = H_{z1} \cdot h_{z1} = 1,15 \cdot 13,4 = 15,41 \text{ A,}$$

где $h_{z1} = h_{n1} = 13,4$ мм – высота зубца статора;

$$F_{z2} = H_{z2} \cdot h_{z2} = 1,52 \cdot 14,93 = 22,7 \text{ A,}$$

где $h_{z2} = h_{n2} - 0,1d_1 = 15,1 - 0,1 \cdot 1,7 = 14,93$ мм – высота зубца ротора.

По второй табл. П.2 определяем, что значению индукции в ярме статора $B_{c1} = 1,6$ Тл соответствует напряженность магнитного поля $H_{c1} = 0,75$ А/мм, а значению индукции в ярме ротора $H_{c2} = 0,171$ А/мм соответствует напряженность магнитного поля $H_{cя} = 0,171$ А/мм. Тогда МДС ярма статора и ярма ротора соответственно равны:

$$F_{c1} = H_{c1} \frac{\pi(D_1 - h_{c1})}{4p} = 0,75 \frac{\pi(131 - 8,1)}{4 \cdot 3} = 24,1 \text{ A;}$$

$$F_{c2} = H_{c2} \frac{\pi(d_{\text{в}} + h_{c2})}{4p} = 0,171 \frac{\pi(30 + 13,6)}{4 \cdot 3} = 1,95 \text{ A.}$$

Намагничающая сила на один полюс по (3.52):

$$\begin{aligned} F_{\Sigma} &= F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_{c1} + F_{c2} = \\ &= 217,7 + 15,41 + 22,7 + 24,1 + 1,95 = 281,86 \text{ A.} \end{aligned}$$

*Современная маркировка сталей приведена в ГОСТ 33212-2014.

55. Намагничивающий ток по (3.53):

$$I_{\mu} = \frac{2pF_{\Sigma}}{0,9m_1W_1k_o} = \frac{6 \cdot 281,86}{0,9 \cdot 3 \cdot 492 \cdot 0,966} = 1,31 \text{ A.}$$

В относительных единицах намагничивающий ток равен:

$$I_{\mu}^* = \frac{I_{\mu}}{I_{1H}} = \frac{1,31}{2,16} = 0,61.$$

В АД мощностью не более 2...3 кВт допускается $I_{\mu}^* \leq 0,5...0,7$.

56. Коэффициенты насыщения по (3.54):

$$k_z = \frac{F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2}}{F_{\delta}} = \frac{217,7 + 15,41 + 22,7}{217,7} = 1,17,$$

$$k_{\mu} = F_{\Sigma}/F_{\delta} = 281,86/217,7 = 1,29,$$

где k_z и k_{μ} – коэффициенты насыщения зубцовой зоны и всей магнитной цепи.

Отличие величины k_z от выбранной в п.9 составляет 6%, что допустимо. Величина коэффициента насыщения всей магнитной цепи обычно составляет $k_{\mu} = 1,2...1,6$.

4.5. Расчет параметров Т-образной схемы замещения

57. Активное сопротивление фазы обмотки статора по (3.55):

$$r_1 = \rho_{M75} \frac{l_{cp} W_1 10^{-3}}{q_{np} n_{el} a_1},$$

где l_{cp} – средняя длина витка: $l_{cp} = 2(l_1 + l_n)$; l_1 и l_n – длины пазовой и лобовой частей обмотки.

Длина лобовой части $l_{\text{л}}$ обмотки равна:

$$l_{\text{л}} = K_{\text{л}} \cdot b_{\text{ср}} + 2B,$$

где $b_{\text{ср}}$ – средняя ширина катушки обмотки статора; $K_{\text{л}}$ – конструктивный коэффициент; B – длины вылета прямолинейной части катушек из паза от торца сердечника до начала отгиба лобовой части.

Для всыпной обмотки, укладываемой в пазы до запрессовки сердечника в корпус, берут $B = 6 \dots 10$ мм. Значение конструктивного коэффициента $K_{\text{л}}$ зависит от исполнения лобовых частей и числа полюсов:

- при $2p = 2$ коэффициент $K_{\text{л}} = 1,2$ для неизолированных лобовых частей и $K_{\text{л}} = 1,45$ для изолированных лобовых частей;
- при $2p = 4$ или 6 коэффициент $K_{\text{л}} = 1,3 \dots 1,4$ для неизолированных лобовых частей и $K_{\text{л}} = 1,55 \dots 1,75$ для изолированных лобовых частей.
- при $2p \geq 8$ коэффициент $K_{\text{л}} = 1,5$ для неизолированных лобовых частей и $K_{\text{л}} = 1,9$ для изолированных лобовых частей.

Средняя ширина катушки обмотки статора:

$$b_{\text{ср}} = \frac{\pi(D + h_{\text{пл}})}{2p} \beta = \frac{\pi(88 + 13,4)}{6} \cdot 1 = 53,1 \text{ мм.}$$

Тогда длина лобовой части $l_{\text{л}}$ и средняя длина витка $l_{\text{ср}}$ обмотки равны:

$$\begin{aligned} l_{\text{л}} &= K_{\text{л}} \cdot b_{\text{ср}} + 2B = 1,55 \cdot 53,1 + 12 = 94,3 \text{ мм;} \\ l_{\text{ср}} &= 2(l_{\text{l}} + l_{\text{л}}) = 2(78 + 94,3) = 344,6 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Следовательно, активное сопротивление фазы обмотки статора:

$$r_1 = \rho_{\text{м75}} \frac{l_{\text{ср}} W_1 10^{-3}}{q_{\text{пп}} n_{\text{эн}} a_1} = \frac{1}{47} \frac{344,6 \cdot 492 \cdot 10^{-3}}{0,302 \cdot 1 \cdot 1} = 11,95 \text{ Ом.}$$

Относительное значение:

$$r_{1*} = r_1 / Z = 11,95 / 101,85 = 0,117 ,$$

где $Z = U_{1H} / I_{1H} = 220 / 2,16 = 101,85$ Ом.

Полученное значение немного выходит за среднестатистические данные (см. п.74 главы 3). Однако необходимость изменения обмоточных данных статора объективно можно принять только после расчета выходных характеристик АД.

Длина вылета лобовой части по (3.57):

$$l_{\text{выл.1}} = (0,19 + 0,1p) b_{\text{ср}} + 10 = (0,19 + 0,1 \cdot 3) 53,1 + 10 = 36 \text{ мм.}$$

58. Активное сопротивление алюминиевого стержня ротора по (3.58):

$$r_c = \rho_{\text{ал75}} \frac{l_c \cdot 10^{-3}}{q_c} = \frac{1}{24,5} \frac{78 \cdot 10^{-3}}{43,2} = 73,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.}$$

59. Сопротивление короткозамыкающего кольца по (3.59):

$$r_k = \rho_{\text{ал75}} \frac{\pi D_k 10^{-3}}{Z_2 q_k} = \frac{1}{24,5} \frac{\pi \cdot 70,1 \cdot 10^{-3}}{28 \cdot 78,3} = 4,15 \cdot 10^{-6} \text{ Ом,}$$

где $D_k = D_2 - h_k = 87,5 - 17,4 = 70,1$ мм.

60. Сопротивление фазы ротора по (3.60):

$$\begin{aligned} r_2 &= r_c + 2 \cdot r_k / \Delta^2 = \\ &= 73,7 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 4,15 \cdot 10^{-6} / 0,66^2 = 92,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом.} \end{aligned}$$

61. Приведенное к статору сопротивление фазы ротора по (3.61):

$$r'_2 = r_2 \frac{4m_1 (W_1 k_o)^2}{Z_2} = 92,7 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3 (492 \cdot 0,966)^2}{28} = 8,97 \text{ Ом.}$$

Относительное значение:

$$r'_{2*} = r'_2 / Z = 8,97 / 101,85 = 0,088.$$

Приведенное сопротивление стержня по (3.62):

$$r'_c = r_c \frac{4m_1(W_1 k_o)^2}{Z_2} = 73,7 \cdot 10^{-6} \frac{4 \cdot 3(492 \cdot 0,966)^2}{28} = 7,13 \text{ Ом.}$$

62. Коэффициент проводимости пазового рассеяния статора по (3.63):

$$\lambda_{n1} = 0,66 + \frac{2h_1}{3(b_1 + b_2)} + \frac{h_{w1}}{b_{w1}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 13,4}{3(6,0 + 4,0)} + \frac{0,5}{2,5} = 1,47.$$

63. Коэффициент проводимости лобового рассеяния статора по (3.64):

$$\lambda_{n1} = 0,34 \frac{q}{l_1} (l_n - 0,64\tau\beta) = 0,34 \frac{2}{78} (94,3 - 0,64 \cdot 46,1 \cdot 1) = 0,56.$$

64. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния по (3.65):

$$\xi_\beta = 1 + 0,9(q-1)|\beta - 0,83| = 1 + 0,9(2-1)|1 - 0,83| = 1,153;$$

$$k_q = 10,5 - 0,2(q-1) = 10,5 - 0,2 \cdot (2-1) = 10,3;$$

$$\lambda_{d1} = \frac{t_1 \cdot k_o^2}{1,1 \cdot k_q \delta \cdot k_\delta} \xi_\beta = \frac{7,7 \cdot 0,966^2}{1,1 \cdot 10,3 \cdot 0,25 \cdot 1,28} 1,153 = 2,19.$$

65. Суммарный коэффициент проводимости рассеяния статора по (3.66):

$$\Sigma \lambda_i = \lambda_{n1} + \lambda_{n1} + \lambda_{g1} = 1,47 + 0,56 + 2,19 = 4,22.$$

66. Индуктивное сопротивление обмотки статора по (3.67):

$$\begin{aligned} X_1 &= 4\pi f \mu_0 W_1^2 \frac{l_1 10^{-3}}{pq_1} \Sigma \lambda_i = \\ &= 1,58 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 492^2 \frac{78}{3 \cdot 2} 4,22 = 10,5 \text{ Ом.} \end{aligned}$$

Относительное значение

$$x_{l_*} = x_l / Z = 10,5 / 101,85 = 0,103.$$

67. Коэффициент проводимости пазового рассеяния ротора по (3.68):

$$\lambda_{n2} = 0,66 + \frac{2h_1}{3(d_1 + d_2)} + \frac{h_{m2}}{b_{m2}} = 0,66 + \frac{2 \cdot 11,6}{3(4,3 + 1,7)} + \frac{0,5}{1} = 1,88.$$

68. Коэффициент проводимости лобового рассеяния ротора по (3.69):

$$\lambda_{n2} = \frac{D_k}{Z_2 I \Delta^2} \ln \frac{4,7 D_k}{h_k + 2l_k} = \frac{70,1}{28 \cdot 78 \cdot 0,66^2} \ln \frac{4,7 \cdot 70,1}{17,4 + 2 \cdot 4,5} = 0,16.$$

69. Коэффициент проводимости дифференциального рассеяния ротора по (3.70):

Для к.з. ротора принимаем $\xi_\beta = 1$, $k_o = 1$, $q_2 = 1$.

$$k_q = 10,5 - 0,2 \cdot (q_2 - 1) = 10,4;$$

$$\lambda_{n2} = \frac{t_2}{1,1 k_q \delta \cdot k_\delta} \xi = \frac{9,8}{1,1 \cdot 10,4 \cdot 0,25 \cdot 1,28} = 2,56.$$

70. Коэффициент проводимости рассеяния скошенных пазов ротора (при $\beta = 1$) по (3.71):

$$\begin{aligned} \beta_{ck} &= \beta \frac{t_1}{t_2} = 1 \frac{7,7}{9,8} = 0,786; \\ \lambda_{ck} &= t_2 \cdot \beta_{ck}^2 / (9,5 \cdot \delta \cdot k_\delta \cdot k_\mu) = \\ &= 9,8 \cdot 0,786^2 / (9,5 \cdot 0,25 \cdot 1,28 \cdot 1,29) = 1,55. \end{aligned}$$

71. Суммарный коэффициент проводимости рассеяния ротора по (3.72):

$$\sum \lambda_2 = \lambda_{n2} + \lambda_{n2} + \lambda_{g2} + \lambda_{ck} = 1,88 + 0,16 + 2,56 + 1,55 = 6,15.$$

72. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора по (3.73):

$$X_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot f \cdot l_2 \sum \lambda_2 = 7,9 \cdot 10^{-9} \cdot 50 \cdot 78 \cdot 6,15 = 1,89 \cdot 10^{-4} \text{ Ом.}$$

73. Приведенное к статорной обмотке индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора по (3.74):

$$X'_2 = X_2 \frac{4m_1 (W_1 k_o)^2}{Z_2} = 1,89 \cdot 10^{-4} \frac{4 \cdot 3 (492 \cdot 0,966)^2}{28} = 18,35 \text{ Ом.}$$

Относительное значение

$$x'_{2*} = x'_2 / Z = 18,35 / 101,85 = 0,18 .$$

74. Сопротивление короткого замыкания по (3.75):

$$C_1 = 1 + X_1 / X_m = 1 + 10,5 / 167,9 = 1,062 ;$$

$$X_m = U_1 / I_\mu = 220 / 1,31 = 167,9 \text{ Ом};$$

$$X_k = C_1 X_1 + C_1^2 \cdot X'_2 = 1,062 \cdot 10,5 + 1,062^2 \cdot 18,35 = 31,85 \text{ Ом.}$$

Относительное значение $x_{m*} = x_m / Z = 167,9 / 101,85 = 1,65 .$

Сравнение вычисленных параметров в относительных единицах со среднестатистическими данными показывает, что относительное значение активного сопротивления обмотки статора спроектированной машины выходит за эти пределы. Однако еще раз подчеркнем, что речь идет именно о среднестатистических данных, а отдельные параметры конкретных машин могут отличаться от этого диапазона [5, 6]. Как уже говорилось выше, необходимости обязательной корректировки обмоточных данных статора на этом этапе расчета нет, такое решение может быть принято позже после анализа выходных показателей спроектированного АД.

4.6. Расчет потерь, не зависящих от нагрузки

75. Основные потери в стали.

Удельные потери $\rho_{1,0/50}$ и показатель степени β для стали 2013 равны $\rho_{1,0/50} = 2,6 \text{ Вт/кг}$, $\beta = 1,5$. Коэффициенты добавочных потерь для зубцов и спинки статора равны соответственно $k_{\text{дз}} = 1,8$, $k_{\text{дс}} = 1,6$.

Масса зубцов и спинки статора:

$$m_{z1} = \left\{ \frac{\pi}{4} [(D + 2h_{n1})^2 - D^2] - Z_1 S_n \right\} l_1 k_c \rho 10^{-6} = \\ = \left\{ \frac{\pi}{4} [(88 + 2 \cdot 13,4)^2 - 88^2] - 36 \cdot 59,23 \right\} 78 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 1,24 \text{ кг}; \\ m_{cl} = \pi \cdot (D_1 - h_{cl}) \cdot h_{cl} \cdot l_1 \cdot k_c \cdot \rho \cdot 10^{-6} = \\ = \pi \cdot (131 - 8,1) \cdot 8,1 \cdot 78 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^{-6} = 1,85 \text{ кг.}$$

Здесь $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ – удельный вес стали.

Потери в стали зубцов статора по (3.77):

$$P_{z1} = k_{\text{дз}} \rho_{1,0/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_{z1}^2 \cdot m_{z1} = \\ = 1,8 \cdot 2,6 \cdot 1^{1,5} \cdot 1,7^2 \cdot 1,24 = 16,8 \text{ Вт.}$$

Потери в стали спинки статора по (3.78):

$$P_{cl} = k_{\text{дс}} \rho_{1,0/50} \cdot (f/50)^\beta \cdot B_{cl}^2 \cdot m_{cl} = \\ = 1,6 \cdot 2,6 \cdot 1^{1,5} \cdot 1,6^2 \cdot 1,85 = 19,7 \text{ Вт.}$$

Основные потери в стали по (3.80):

$$P_c = P_{z1} + P_{cl} = 16,8 + 19,7 = 36,5 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери в стали по (3.81):

$$P_{c,d} = P_{z1} 2,5 \sqrt{0,1 t_1 (k_d - 1)^3} = \\ = 16,8 \cdot 2,5 \sqrt{0,1 \cdot 7,7 (1,28 - 1)^3} = 5,5 \text{ Вт.}$$

Полные потери в стали по (3.82):

$$P_{\text{cr}} = P_{\text{c}} + P_{\text{c.g.}} = 36,5 + 5,5 = 42 \text{ Вт.}$$

76. Электрические потери холостого хода:

$$P_{\text{э10}} = 3 \cdot I_{\mu}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 1,31^2 \cdot 11,95 = 61,5 \text{ Вт.}$$

77. Механические потери (в подшипниках и вентиляционные) по (3.85):

$$\begin{aligned} P_{\text{мех}} &= k_{\text{м}} (6 \cdot n)^2 (D_1 / 1000)^4 = \\ &= 1,13 \cdot (6 \cdot 16,67)^2 (131 / 1000)^4 = 3,5 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

где $k_{\text{м}} = 1,3 \cdot (1 - D_{\text{н}} / 1000) = 1,3 \cdot (1 - 131 / 1000) = 1,13$ для $2p = 6$.

78. Активная составляющая тока холостого хода по (3.89):

$$I_{0a} = \frac{P_{\text{cr}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{э10}}}{3U} = \frac{42 + 3,5 + 61,5}{3 \cdot 220} = 0,16 \text{ А.}$$

79. Ток и коэффициент мощности холостого хода:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{\mu}^2} = \sqrt{0,16^2 + 1,31^2} = 1,32 \text{ А};$$

$$\cos \varphi_{xx} = \frac{I_{0a}}{I_0} = \frac{0,16}{1,32} = 0,121.$$

80. Активное сопротивление ветви намагничивания:

$$r_m = P_{\text{cr}} / (m_1 I_{\mu}^2) = 42 / (3 \cdot 1,31^2) = 8,16 \text{ Ом.}$$

Относительное значение $r_{m*} = r_m / Z = 8,16 / 101,85 = 0,08$.

Величина $r_{m*} = r_m / Z$ обычно составляет 0,05...0,2.

4.7. Расчет выходных характеристик

81. Расчет рабочих характеристик.

Для расчета необходимы следующие данные: $U_1 = 220$ В; $C_1 = 1,062$; $r_1 = 11,95$ Ом; $r'_2 = 8,97$ Ом; $X_k = 31,85$ Ом; $I_{0a} = 0,16$ А; $I_{0p} = I_\mu = 1,31$ А; $P_{ct} + P_{mex} = 45,5$ Вт.

Номинальное скольжение (предварительно) по (3.91):

$$s'_{\text{н}} \approx r'_2 I_{1\text{н}} / U_1 = 8,97 \cdot 2,16 / 220 = 0,088.$$

Результаты расчета рабочих характеристик приведены в табл. 4.1. По этим результатам строим рабочие характеристики, которые показаны на рис. 4.4.

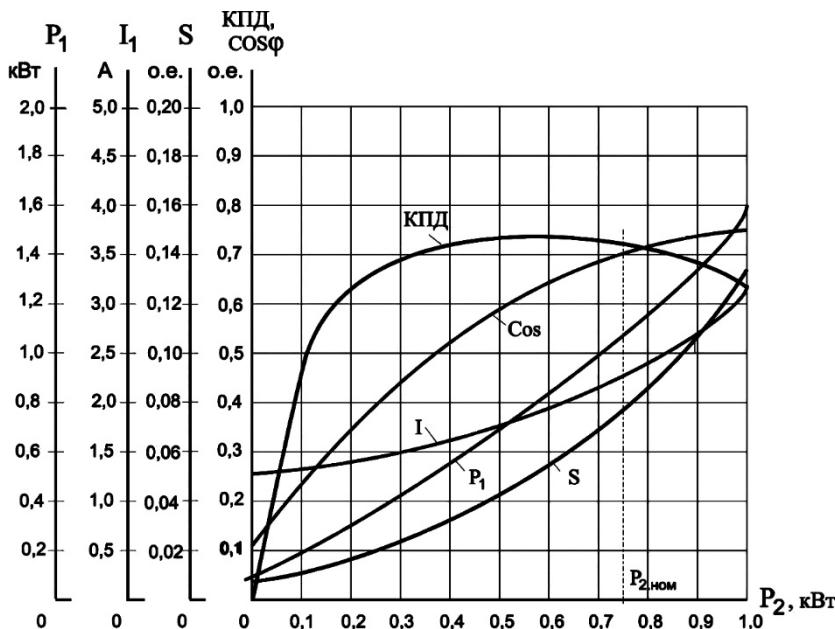


Рис. 4.4. Рабочие характеристики

Исходные данные

U_1	C_1	R_1	R_2	X_k	I_{ba}	I_n	$P_e + P_{\text{мех}}$
220	1,062	11,95	8,97	31,85	0,16	1,31	45,5

Таблица 4.1

Результаты расчета рабочих характеристик

s	R	Z	I''_2	I'_2	I_{ba}	I_{lp}	I_l	$\cos\phi$	P_1	P_{j1}	P_{j2}	P_{106}	P_{eyn}	P_2	KPI	$s, \%$
0						1,31973	0,109	105,6				0	0	0	0	0
0,01	1024,4	1024,9	0,21	0,23	0,37	1,32	1,37	0,274	247	67,2	1,4	1,2	115,3	131,9	0,534	1
0,02	518,5	519,5	0,42	0,45	0,58	1,34	1,46	0,400	385	76,2	5,4	1,9	129,0	255,5	0,665	2
0,03	249,9	351,4	0,63	0,66	0,78	1,37	1,58	0,497	517	89,0	11,9	2,6	149,0	368,2	0,712	3
0,04	265,6	267,5	0,82	0,87	0,98	1,41	1,71	0,570	645	105,3	20,5	3,2	174,5	470,0	0,729	4
0,05	215,0	217,4	1,01	1,07	1,16	1,46	1,86	0,623	766	124,6	31,1	3,8	205,0	561,4	0,733	5
0,06	181,3	184,1	1,20	1,27	1,34	1,52	2,02	0,661	882	146,6	43,4	4,4	239,8	642,7	0,728	6
0,07	157,2	160,4	1,37	1,46	1,50	1,58	2,18	0,689	993	170,9	57,1	5,0	278,4	714,3	0,720	7
0,0755	146,7	150,1	1,47	1,56	1,59	1,62	2,27	0,701	1051	185,1	65,2	5,3	301,1	750,0	0,714	7,55
0,09	125,1	129,1	1,70	1,81	1,81	1,73	2,51	0,723	1196	225,0	88,1	6,0	364,6	831,0	0,695	9

По результатам расчета определяем **расчетные номинальные данные**, выбирая по рабочим характеристикам значения, соответствующие номинальной мощности:

- полезная мощность на валу $P_2 = 750$ Вт;
- коэффициент полезного действия $\eta = 0,714$;
- коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,701$;
- скольжение $s = 0,0755$;
- ток статора $I_1 = 2,27$ А;
- ток ротора $I'_2 = 1,56$ А.

82. Расчет пусковых характеристик.

Приближенное значение критического скольжения

$$s_{kp} \approx r'_2 / (X_1/C_1 + X'_2) = 8,97 / (10,5/1,062 + 18,35) = 0,32.$$

Для этого скольжения принимают $k_h = 1,05\dots1,2$.

При $s = 1$ коэффициент насыщения выбираем $k_h = 1,2$, а при критическом скольжении s_{kp} выбираем $k_h = 1,08$. Для определения k_h в диапазоне от $s = 1$ до $s = s_{kp}$ принимают, что его изменение в этом диапазоне происходит по линейному закону.

Исходные данные

U_1	I_{1nom}		s_{nom}		I'_{2nom}
220	2,27		0,0755		1,56

h_{n2}	d_1	d_2	h_1	r'_c	r'_2	λ_{n2}	h_{m2}	b_{m2}	$\Sigma\lambda_2$	X'_2
15,1	1,7	4,3	11,6	7,13	8,97	1,88	0,5	1	6,15	18,35

R_1	C_1	X_1	X_m	N_n	β	k_o	Z_1	Z_2	a_1	t_1
11,95	1,062	10,5	167,9	82	1	0,966	36	28	1	7,7

t_2	δ	b_{m1}	h_{m1}	λ_{n1}	$\lambda_{a,g1}$	λ_{s1}	$\Sigma\lambda_1$	λ_{g2}	λ_{s2}
9,8	0,25	2,5	0,5	1,47	2,19	0,56	4,22	2,56	0,16

Результаты расчета пусковых характеристик приведены в табл. 4.2 и на рис. 4.5.

Таблица 4.2

Расчет пусковых характеристик

Учет вытеснения										
<i>s</i>	<i>e</i>	<i>2e</i>	<i>K_r</i>	<i>K_d</i>	<i>h_r</i>	<i>q_c</i>	<i>b_r</i>	<i>q_r</i>	<i>K_R</i>	<i>r'_{2n}</i>
0	0,000	0,000								
0,1	0,310	0,621	1,001	1,000	15,09	43,20	1,40	43,20	1,000	8,97
0,2	0,439	0,878	1,003	0,999	15,05	43,20	1,41	43,20	1,000	8,97
0,3	0,538	1,075	1,007	0,998	14,99	43,20	1,42	43,20	1,000	8,97
0,4	0,621	1,242	1,013	0,996	14,90	43,20	1,44	43,20	1,000	8,97
0,5	0,694	1,388	1,020	0,994	14,80	43,20	1,47	43,20	1,000	8,97
0,6	0,760	1,521	1,029	0,992	14,67	43,20	1,49	43,20	1,000	8,97
0,7	0,821	1,642	1,040	0,989	14,52	43,20	1,53	43,20	1,000	8,97
0,8	0,878	1,756	1,052	0,985	14,36	43,20	1,56	43,20	1,000	8,97
0,9	0,931	1,862	1,065	0,981	14,18	43,20	1,60	43,20	1,000	8,97
1	0,982	1,963	1,080	0,977	13,99	43,20	1,65	43,20	1,000	8,97

Учет насыщения										
<i>I₁</i>	<i>K_u</i>	<i>B</i>	<i>C_s</i>	$\Delta\lambda_{\text{ат},\text{in}}$	$\lambda_{\text{ат},\text{in}}$	$\lambda_{\text{аг},\text{in}}$	$\Delta\lambda_{\text{аг},\text{in}}$	$\lambda_{\text{аг},\text{in}}$	<i>X_{2n}</i>	<i>Z_{кни}</i>
2,49	1	0,85	0,36	0,017	1,453	2,040	0,084	0,602	0,188	1,69
3,82	1,03	1,35	0,56	0,026	1,444	1,954	0,947	0,950	0,244	1,64
4,72	1,06	1,71	0,71	0,032	1,438	1,890	9,673	1,206	0,273	1,60
5,32	1,08	1,97	0,82	0,036	1,434	1,845	9,553	0,290	1,58	2,16
5,73	1,1	2,16	0,90	0,039	1,431	1,811	9,462	1,521	0,302	1,57
6,03	1,12	2,31	0,96	0,041	1,429	1,785	9,389	1,629	0,310	1,56
6,25	1,14	2,44	1,02	0,043	1,427	1,762	9,329	1,720	0,316	1,55
6,42	1,17	2,58	1,07	0,044	1,426	1,739	9,267	1,813	0,322	1,54
6,56	1,19	2,68	1,11	0,046	1,424	1,721	9,220	1,883	0,327	1,53
6,67	1,21	2,77	1,15	0,047	1,423	1,705	9,178	1,947	0,330	1,52

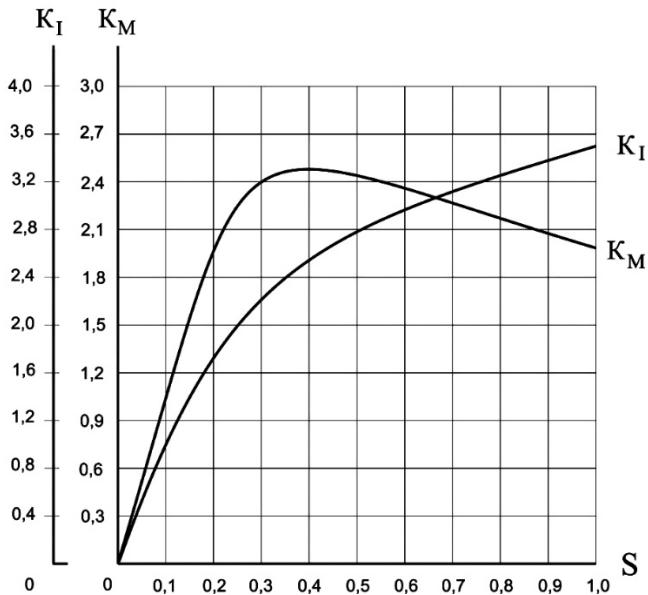


Рис. 4.5. Пусковые характеристики

Примечание: Полученный в расчете фактический коэффициент насыщения при $s = 1$ равен

$$k_h = I_{1\text{вн}} / I_1 = 7,94 / 6,67 = 1,19.$$

Таким образом, выбранный выше $k_h = 1,2$ (см. начало п. 82) мало отличается от фактического (на 0,85%), поэтому пересчет машины производить не надо (обычно допускается расхождение до 5%).

Определяем *пусковые свойства и перегрузочную способность* спроектированного электродвигателя по рассчитанным пусковым характеристикам:

- кратность пускового момента $K_M = M_\pi / M_h = 2,01$;
- кратность пускового тока $K_I = I_\pi / I_{1h} = 3,5$;
- перегрузочная способность $K_{\text{пер.}} = M_{\text{макс}} / M_h = 2,51$.

Сравнение полученных в результате электромагнитного расчета параметров с заданными по техническому заданию приведено в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Сравнение расчетных и заданных параметров

Наименование параметра	Значение параметра	
	по заданию	по расчету
1. Полезная мощность, кВт	0,75	0,75
2. КПД	0,7	0,714
3. Коэффициент мощности cosφ	0,74	0,701
4. Кратность пускового момента $K_{\Pi} = M_{\Pi} / M_h$, не менее	2,0	2,01
5. Кратность максимального момента $K_M = M_M / M_h$, не менее	2,2	2,51
6. Кратность пускового тока I_{Π} / I_h , не более	4,0	3,5

Видно, что спроектированный электродвигатель удовлетворяет исходным данным (расхождение расчетных и заданных энергетических показателей лежит в допустимых пределах, оговоренных в ГОСТ IEC 60034-1-2014).

4.8. Вентиляционный расчет

Расчет вентиляционной цепи электродвигателя

83. Требуемый для охлаждения машины расход воздуха по формуле (3.93):

$$Q = \frac{\Sigma P_b}{C_b \Delta t} = \frac{299,25}{1100 \cdot 12} = 0,0227 \text{ м}^3/\text{с},$$

где ΣP_b – сумма греющихся потерь, Вт;

$$\Sigma P_b = \Sigma P - P_{\text{подш}} = \Sigma P - 0,5 \cdot P_{\text{мех}} = 301 - 0,5 \cdot 3,5 = 299,25 \text{ Вт}.$$

Для выбранного класса нагревостойкости изоляции В разность температур воздуха на выходе и входе машины равна:

$$\Delta t = 0,15 \cdot \Delta t_{\text{доп}} = 0,15 \cdot 80 = 12^\circ\text{C}; \\ C_b = 1100 \text{ Дж/}^\circ\text{C} \cdot \text{м}^3.$$

84. Диаметр решетки, на котором расположены входные отверстия (3.95):

$$D_p = (0,7 \dots 0,9) D_1 = 0,8 \cdot 131 = 104,8 \text{ мм} \approx 105 \text{ мм.}$$

Принимаем квадратные отверстия размером:

$$a_o \times b_o = 10 \times 10.$$

Площадь отверстия:

$$S_o = a_o \cdot b_o = 10 \cdot 10 = 100 \text{ мм}^2.$$

Перемычки между отверстиями $b_{\text{пер}} = 1 \dots 5$ мм. Принимаем $b_{\text{пер}} = 1$ мм.

85. Количество отверстий по (3. 96):

$$N_o = \frac{k_{3,0} \pi D_p^2}{4(b_o + b_{\text{пер}})^2} = \frac{0,9 \cdot \pi \cdot 105^2}{4(10+1)^2} = 64.$$

Здесь $k_{3,0} = 0,7 \dots 0,9$ – коэффициент заполнения площади.

Окончательно $N_o = 64$ и $D_p = 105$ мм.

86. Принимаем пластмассовый кожух вентилятора с окнами, имеющими острые края. Для такого кожуха коэффициент аэродинамического сопротивления $\xi_{\text{вх}}$ рассчитываем по формуле (3.97):

$$\xi_{\text{вх}} = \left(\frac{1,707}{f} - 1 \right)^2,$$

где $f = S_{\text{отв}} / S_p = N_o S_o / S_p$; $S_{\text{отв}}$ – сечение отверстий; S_p – сечение решетки.

$$f = \frac{N_o S_o}{S_p} = \frac{N_o S_o}{\pi \cdot D_p^2 / 4} = \frac{64 \cdot 100}{\pi \cdot 105^2 / 4} = 0,74.$$

Коэффициент сопротивления входа:

$$\xi_{\text{bx}} = \left(\frac{1,707}{f} - 1 \right)^2 = \left(\frac{1,707}{0,74} - 1 \right)^2 = 1,69.$$

87. Аэродинамическое сопротивление входа по (3.102):

$$Z_{\text{bx}} = \xi_{\text{bx}} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{\text{bx}}^2} = 1,69 \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{6400^2} = 24756 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6.$$

Здесь $S_{\text{bx}} = N_0 S_0 = 64 \cdot 100 = 6400 \text{ мм}^2$.

88. Коэффициенты и аэродинамические сопротивления остальных участков воздухопровода.

Расширение в кожухе вентилятора по (3.103) и (3.104):

$$\xi_{\text{расш}} = \left(1 - \frac{S_{1\text{мин}}}{S_{\text{макс}}} \right)^2 = \left(1 - \frac{6400}{25434} \right)^2 = 0,56;$$

$$Z_{\text{расш}} = \xi_{\text{расш}} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{1\text{мин}}^2} = 0,563 \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{6400^2} = 8203 \text{ Па} \cdot \text{с}^2 / \text{м}^6.$$

Здесь $S_{1\text{мин}} = S_{\text{bx}}$.

$$D_{\text{кож}} = D_1 + 2 \cdot (h_{\text{ct}} + h_{\text{реб}}) = 131 + 2 \cdot (4,5 + 20) = 180 \text{ мм}.$$

Толщина станины $h_{\text{ct}} = (0,05 \dots 0,07)h$, принимаем $h_{\text{ct}} = 4,5 \text{ мм}$.
Высота ребра $h_{\text{реб}} = (0,15 \dots 0,25)h$, принимаем $h_{\text{реб}} = 20 \text{ мм}$.

$$S_{\text{макс}} = S_{\text{кож}} = \pi \cdot D_{\text{кож}}^2 / 4 = 0,785 \cdot 180^2 = 25434 \text{ мм}^2.$$

Поворот к вентилятору на угол α_1 по (3.107):

$$\begin{aligned} \xi_{\alpha_1} &= A \left(0,95 \sin^2 \frac{\alpha_1}{2} + 2,05 \sin^4 \frac{\alpha_1}{2} \right) = \\ &= 1,5 \left(0,95 \sin^2 30^\circ + 2,05 \sin^4 30^\circ \right) = 0,548, \end{aligned}$$

$\alpha_1 = 60^\circ$ – угол наклона воронки вентилятора к оси вращения.

Коэффициент A принимаем по табл. 3.17 для $\alpha_1 = 60^\circ$ равным $A = 1,5$,

$$Z_{a1} = \xi_{a1} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{\text{кож}}^2} = 0,548 \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{25434^2} = 508 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6.$$

Поворот при входе из вентилятора на угол $\alpha_2 = 60^\circ$

$$\xi_{a2} = 0,548, Z_{a2} = 508 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6.$$

Сужение при входе в станину по (3.109):

$$\xi_{\text{суж}} = 0,5 \left(1 - \frac{S_{2\text{мин}}}{S_{\text{макс}}}\right)^2 = \left(1 - \frac{10048}{25434}\right)^2 = 0,183.$$

Здесь

$$S_{2\text{мин}} = \pi/4(D_{\text{кож}}^2 - D_{\text{стан}}^2) = 0,785 \cdot (180^2 - 140^2) = 10048 \text{ мм}^2;$$

$$S_{\text{макс}} = S_{\text{кож}}, D_{\text{стан}} = D_1 + 2 \cdot h_{\text{стан}} = 131 + 2 \cdot 4,5 = 140 \text{ мм};$$

$$Z_{\text{суж}} = \xi_{\text{суж}} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{2\text{мин}}^2} = 0,183 \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{10048^2} = 1088 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6.$$

Выход из кожуха вентилятора по (3.111):

$$\xi_{\text{вых}} = 1, Z_{\text{вых}} = \xi_{\text{вых}} \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{S_{2\text{вых}}^2} = 1 \frac{0,6 \cdot 10^{12}}{10048^2} = 5943 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6.$$

89. Суммарное сопротивление воздухопровода по (3.112):

$$Z = Z_{\text{вх}} + Z_{\text{расп}} + Z_{a1} + Z_{a2} + Z_{\text{суж}} + Z_{\text{вых}} = \\ = 24756 + 8203 + 508 + 508 + 1088 + 5943 = 41006 \text{ Па} \cdot \text{с}^2/\text{м}^6.$$

Расчет вентилятора

90. Наружный диаметр вентилятора по (3.113):

$$D_2 = (0,8 \div 0,9) D_{\text{кок}} = 0,8 \cdot 180 = 144 \text{ мм.}$$

91. Окружная скорость лопатки по (3.114):

$$U_2 = \pi \cdot D_2 \cdot n = \pi \cdot 0,144 \cdot 16,6 = 7,51 \text{ м/с.}$$

92. Максимальный расход воздуха (при отсутствии внешнего сопротивления, т.е. при $Z = 0$) по (3.115):

$$Q_m = 2 Q = 2 \cdot 0,0227 = 0,0454 \text{ м}^3/\text{с.}$$

93. Площадь выходного сечения вентилятора по (3.116):

$$S_2 = \frac{Q_m}{0,42 \cdot U_2} = \frac{0,0454}{0,42 \cdot 7,51} = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 = 14400 \text{ мм}^2.$$

94. Ширина лопатки по (3.117):

$$b = \frac{S_2}{0,92 \cdot \pi \cdot D_2} = \frac{14400}{0,92 \cdot \pi \cdot 144} = 34,5 \text{ мм.}$$

95. Диаметр втулки вентилятора по (3.118):

$$D_{\text{вт}} = (1,05 \dots 1,3) \cdot d_{\text{вент}} = 1,3 \cdot 24 = 31,2 \text{ мм,}$$

где $d_{\text{вент}} = 24$ мм – диаметр вала под вентилятором.

96. Средний внутренний диаметр вентилятора по (3.119):

$$D_1 = (1,2 \dots 1,4) D_{\text{вт}} = 1,38 \cdot 31,2 = 43,1 \text{ мм.}$$

Диаметр D_1 уточним при конструировании вентилятора.

97. Окружная скорость лопаток на среднем внутреннем диаметре:

$$U_1 = \pi \cdot D_1 \cdot n = \pi \cdot 43,1 \cdot 10^{-3} \cdot 16,6 = 2,25 \text{ м/с.}$$

98. Давление холостого хода вентилятора по (3.121):

$$H_0 = \eta_0 \cdot \rho (U_2^2 - U_1^2) = 0,6 \cdot 1,2 (7,51^2 - 2,25^2) = 37 \text{ Па},$$

где η_0 – аэродинамический КПД вентилятора (для вентилятора с радиальными лопатками $\eta_0 = 0,6$); $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ – плотность воздуха.

99. Действительный расход воздуха вычисляем по формуле (3.122):

$$\begin{aligned} Q' &= Q_m \sqrt{\frac{H_o}{H_o + Z \cdot Q_m^2}} = \\ &= 0,0454 \sqrt{\frac{37}{37 + 41006 \cdot 0,0454^2}} = 0,0251 \text{ м}^3/\text{с}. \end{aligned}$$

Вентилятор обеспечивает расход больше требуемого (см. п. 83), т.е. обеспечивает необходимый обдув электродвигателя.

100. Давление вентилятора по (3.123):

$$H = Z \cdot Q'^2 = 41006 \cdot 0,0251^2 = 25,8 \text{ Па.}$$

101. Мощность, потребляемая вентилятором по (3.124):

$$P_{\text{вент}} = Q' \cdot H / \eta_{\text{в}} = 0,0251 \cdot 27,3 / 0,2 = 3,4 \text{ Вт},$$

где $\eta_{\text{в}}$ – механический КПД вентилятора (при радиальных лопатках $\eta_{\text{в}} = 0,15 \dots 0,20$).

Данная потребляемая мощность идет на приздание воздуху кинетической энергии и не греет саму машину, поскольку движущийся охлаждающий воздух выходит из машины и его энергия расходуется непосредственно в окружающем пространстве.

102. Число лопаток вентилятора $N_{\text{лоп}}$ берут в зависимости от диаметра вентилятора в пределах 5...13. Принимаем $N_{\text{лоп}} = 12$ (рис. 4.6).

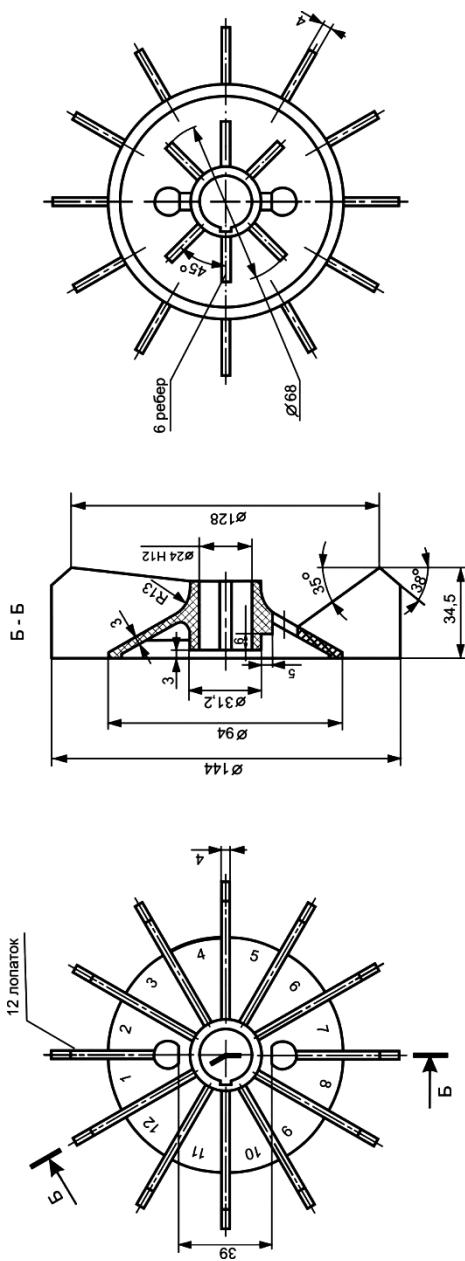


Рис. 4.6. Общий вид центробежного вентилятора

4.9. Тепловой расчет

103. Превышение температуры внутренней поверхности сердечника статора над температурой воздуха внутри машины по (3.125):

$$\Delta V_{\text{Плов.1}} = K \frac{P'_{\text{э.пл}} + P_c}{\pi D l_1 \alpha_1} = 0,19 \frac{96 + 36,5}{\pi \cdot 0,088 \cdot 0,078 \cdot 75} = 15,5^{\circ}\text{C}.$$

Для машин исполнения IP44 при $2p = 6$ по табл. 3.18 находим $K = 0,19$.

$P'_{\text{э.пл}}$ – потери в пазовой части обмотки по (3.126):

$$P'_{\text{э.пл}} = k_p P_{\text{э1}} \frac{2l_1}{l_{\text{cp.1}}} = 1,15 \cdot 185,1 \frac{2 \cdot 78}{345} = 96 \text{ Вт},$$

где $k_p = 1,15$ – коэффициент увеличения потерь для изоляции класса B ; α_1 – коэффициент теплоотдачи с поверхности (при $2p = 6$ и $D_1 = 0,131$ м по рис. 3.13 имеем $\alpha_1 = 75 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$).

104. Перепад температуры в изоляции пазовой части обмотки статора

$$\begin{aligned} \Delta V_{\text{из.пл}} &= \frac{P'_{\text{э.пл}}}{Z_1 \Pi_{\text{пл}} l_1} \left(\frac{b_{\text{из.1}}}{\lambda_{\text{экв}}} + \frac{b_1 + b_2}{16 \lambda'_{\text{экв}}} \right) = \\ &= \frac{96}{36 \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,0368} \left(\frac{0,2}{0,16} + \frac{6,0 + 4,0}{16 \cdot 1,02} \right) 10^{-3} = 1,7^{\circ}\text{C}, \end{aligned}$$

где $\Pi_{\text{пл}}$ – расчетный периметр поперечного сечения паза:

$$\Pi_{\text{пл}} = 2 \cdot h_{\text{пл}} + b_1 + b_2 = (2 \cdot 13,4 + 6,0 + 4,0) \cdot 10^{-3} = 36,8 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$\lambda'_{\text{экв}} = 1,02 \text{ Вт}/\text{м} \cdot \text{град}$ для $d / d_{\text{из}} = 0,62 / 0,675 = 0,918$ по рис. 3.8.

105. Перепад температуры по толщине изоляции лобовых частей:

$$\Delta V_{\text{из.л1}} = \frac{P'_{\text{э.л1}}}{2Z_1\Pi_{\text{л1}}l_{\text{л}}} \frac{h_{\text{nl}}}{12\lambda'_{\text{экв}}} = \\ = \frac{116,1}{2 \cdot 36 \cdot 36,8 \cdot 10^{-3} \cdot 94,3 \cdot 10^{-3}} \frac{13,4 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 1,02} = 0,5^{\circ}\text{C},$$

где $P'_{\text{э.л1}}$ – потери в лобовой части обмотки:

$$P'_{\text{э.л1}} = k_{\rho} P_{\text{э1}} \frac{2l_{\text{л}}}{l_{\text{cp.1}}} = 1,15 \cdot 185,1 \frac{2 \cdot 94,3}{345} = 116,1 \text{ Вт}; \\ \Pi_{\text{л1}} \approx \Pi_{\text{п1}} = 36,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

106. Превышение температуры наружной поверхности лобовых частей над температурой воздуха внутри машины по (3.129):

$$\Delta V_{\text{Пов.л1}} = \frac{K \cdot P'_{\text{э.л1}}}{2\pi \cdot D l_{\text{выл.1}} \alpha_1} = \frac{0,19 \cdot 116,1}{2\pi \cdot 0,088 \cdot 0,0365 \cdot 75} = 14,5^{\circ}\text{C}.$$

107. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой воздуха внутри машины по (3.130):

$$\Delta V'_1 = \frac{2}{l_{\text{cp1}}} [(\Delta V_{\text{пов.1}} + \Delta V_{\text{из.п1}})l_1 + (\Delta V_{\text{пов.л1}} + \Delta V_{\text{из.л1}})l_{\text{л}}] = \\ = \frac{2}{345} [(15,5 + 1,7)78 + (0,5 + 14,5)94,3] = 15,9^{\circ}\text{C}.$$

108. Превышение температуры воздуха внутри двигателя над температурой охлаждающего воздуха по (3.131):

$$\Delta V_{\text{в}} = \frac{\sum P'_{\text{в}}}{S_{\text{дв}} \alpha_{\text{в}}} = \frac{221,6}{0,285 \cdot 17} = 45,7^{\circ}\text{C},$$

где $P'_{\text{в}}$ – сумма потерь, отводимых в воздух внутри двигателя по (3.132):

$$\begin{aligned} \sum P'_{\text{в}} &= \sum P + (k_p - 1) \cdot (P_{\text{э1}} + P_{\text{э2}}) - (1 - K) \cdot (P'_{\text{эл1}} + P_{\text{с}}) - 0,9 \cdot P_{\text{мех}} = \\ &= 301,1 + (1,15 - 1) \cdot (185,1 + 65,2) - (1 - 0,19) \cdot (96 + 36,5) - \\ &\quad - 0,9 \cdot 3,5 = 221,6 \text{ Вт}, \end{aligned}$$

$S_{\text{дв}}$ – условная поверхность охлаждения двигателя

$$\begin{aligned} S_{\text{дв}} &= (\pi D_1 + 8\Pi_p) \cdot (l_1 + 2 \cdot l_{\text{выл.1}}) = \\ &= (\pi \cdot 0,131 + 8 \cdot 0,15) \cdot (0,078 + 2 \cdot 0,0365) = 0,285 \text{ м}^2, \end{aligned}$$

$\Pi_p = 0,15$ м – периметр поперечного сечения ребер станины (выбираем по рис. 3.15 при $h = 80$ мм); $\alpha_{\text{в}} = 17 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град}$ – выбран по рис. 3.13.

109. Среднее превышение температуры обмотки статора над температурой охлаждающего воздуха по (3.133):

$$\Delta V_1 = \Delta V'_1 + \Delta V_{\text{в}} = 15,9 + 45,7 = 61,6^\circ\text{C}.$$

Такое превышение температуры для изоляции класса *B* допустимо (см. табл. 3.2). Для электрических машин согласно ГОСТ IEC 60034-1-2014 максимальная температура окружающего воздуха составляет 40°C . Таким образом, средний нагрев обмотки статора составит $V_1 = 61,6 + 40 = 101,6^\circ\text{C}$.

4.10. Разработка конструкции

Последовательность выполнения чертежа следующая. Сначала вычерчиваются активные части АД: изображается сердечник ротора (откладывается внутренний диаметр $d_{\text{в}}$, внешний диаметр

D_2 и длина l_2), сердечник статора (внутренний диаметр D , внешний диаметр D_1 и длина l_1) и затем изображаются лобовые части обмоток статора. На роторе изображаются к.з. кольца (ширина l_k и высотой h_k) и вентиляционные лопатки ротора.

Затем вычисляем размеры станины.

1. Средняя толщина стенки станины:

$$h_{\text{стан}} = 2,5 + 0,025 \cdot h = 2,5 + 0,025 \cdot 80 = 4,5 \text{ мм},$$

где h – высота оси вращения двигателя, мм.

2. Наружный диаметр станины:

$$D_{\text{стан}} = D_1 + 2 \cdot h_{\text{стан}} = 131 + 2 \cdot 4,5 = 140 \text{ мм}.$$

3. Длина станины:

$$L_{\text{стан}} = L_1 + (1,5 \dots 2,0) L_{\text{выл.л}} = 78 + 2 \cdot 36 = 150 \text{ мм},$$

где $L_{\text{выл.л}} = 36$ мм (см. п.57 стр. 91).

4. Число ребер N_p :

$$N_p \approx 6,4 \sqrt[3]{h} = 6,4 \sqrt[3]{80} = 27,6 \text{ шт.}$$

Полученное значение числа ребер N_p необходимо округлить до целого значения, кратного четырем, поэтому принимаем $N_p = 24$ шт.

5. Длина ребра L_p равна:

$$L_p \approx L_{\text{стан}} - (5 \dots 10) \text{ мм} = 150 - 6 = 144 \text{ мм}.$$

6. Высота ребра h_p :

$$h_p = (0,15 \dots 0,25) h = 0,25 \cdot 80 = 20 \text{ мм}.$$

7. Средняя толщина ребра b_p :

$$b_p = (b_{pb} + b_{po})/2 = (3 + 4)/2 = 3,5 \text{ мм},$$

где b_{pb} и b_{po} – ширина верхней части и основания ребра:

$$b_{pb} = 2r_p = 2 \cdot 1,5 = 3 \text{ мм}; \quad b_{po} = b_{pb} + 0,05 h_p = 4 \text{ мм};$$

r_p – радиус верхней части ребра ($r_p = 1,0$ мм при $h = 56$ и 63 мм; $r_p = 1,5$ мм при $h = 71\dots 132$ мм; $r_p = 2,5$ при $h = 160\dots 250$ мм; $r_p = 3\dots 4,5$ мм при $h > 250$ мм).

8. Минимально допустимое расстояние от нижней точки статники до опорной поверхности лап:

$$h_{min} \approx 3 + (0,015\dots 0,02) h = 3 + 0,0175 \cdot 80 = 4,4 \text{ мм.}$$

После этого вычерчиваем станину, подшипниковые щиты и вентилятор с учетом заданных значений по степени защиты и конструктивного исполнения. При этом учитываем, что в проектируемом АД применяются подшипники серии 180000 с двухсторонним уплотнением и постоянно заложенной смазкой, поэтому необходимость в подшипниковых крышках отпадает.

Размеры остальных конструктивных деталей и узлов принимается приближенно на основе размерных соотношений чертежа, принятого за базу при конструировании [5].

Разрез на чертеже располагаем следующим образом. На продольном виде показываем разрез в верхней части чертежа от осевой линии. На разрезе показываем болты, крепящие подшипниковые щиты к станине, и болты, крепящие крышки подшипников к подшипниковым щитам, а также конструкция и способ крепления сердечников, вентилятора, коробки выводов и т.п. Нижняя половина чертежа выполняется без разрезов и представляет собой вид на машину снаружи.

На рисунке 4.7 показан продольный и поперечный разрезы спроектированного электродвигателя.

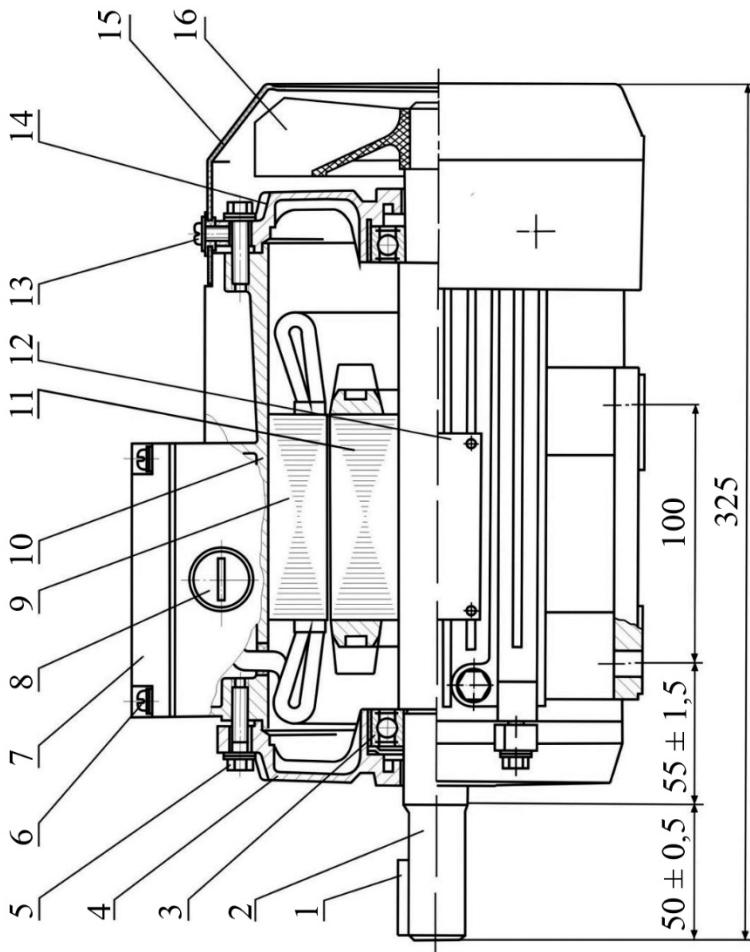
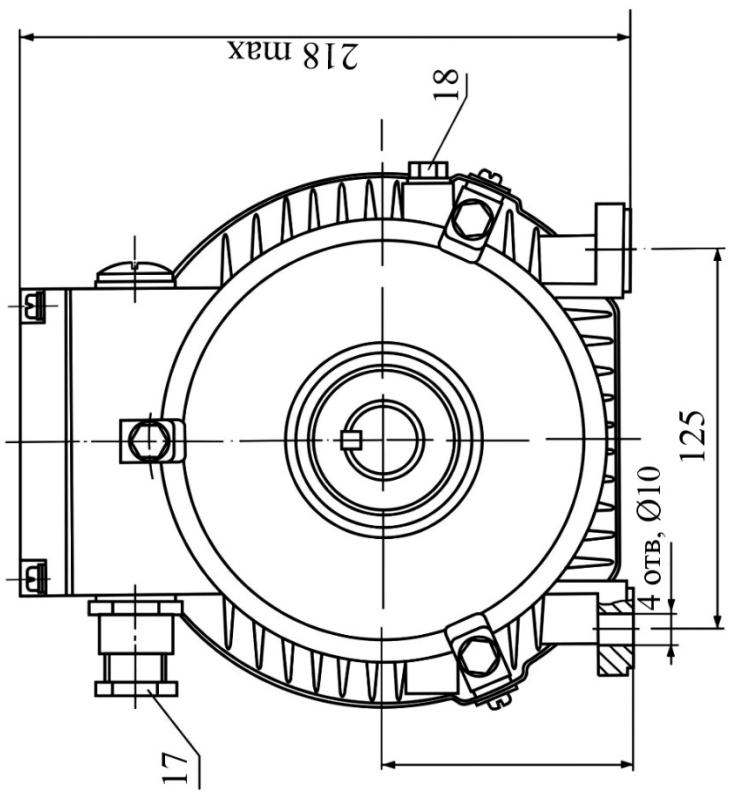


Рис. 4.7. Общий вид спроектированного электродвигателя



Окончание рис. 4.7

Магнитопровод статора 9 шихтован из холоднокатаной изотропной электротехнической стали марки 2013, листы оксидированы и скреплены в пакет сваркой по наружной поверхности. Пазы изолированы лавсановой пленкой ПЭТФ и закрыты пазовыми крышками из такой же пленки. Концы обмотки статора выведены в коробку выводов через резиновую уплотнительную втулку. Пакет статора с обмоткой запрессован в станину 10 из алюминиевого сплава АЛ9 ГОСТ 1583-93.

Коробка выводов, охлаждающие ребра и лапы отлиты вместе со станиной в литейной форме, имеющие четыре радиальных разъема, при этом ребра в пределах каждой четверти окружности расположены параллельно друг другу. Предусмотрена возможность ввода кабеля в коробку выводов с левой или с правой стороны; для этого штуцер 17 присоединяют к коробке выводов с нужной стороны, а свободное отверстие закрывают пробкой 8. Коробка выводов закрыта крышкой 7, которая крепится к основанию коробки при помощи винтов 6. Подшипниковые щиты 4 и 14, отлитые из алюминиевого сплава АЛ9, прикреплены к станине 10 болтами 5. Ступицы щитов для повышения прочности армированы стальными втулками и снабжены внутренними ребрами. Для центровки щитов относительно станины на них выполнены выточки, а на станине – заочки, которые образуют замковое соединение.

Ротор 11 короткозамкнутый, имеет магнитопровод, шихтованный из электротехнической стали марки 2013, и литую обмотку из алюминия марки А5 ГОСТ 11069-2019. Короткозамыкающие кольца отлиты вместе с вентиляционными лопатками, в кольцах выполнены канавки для крепления балансировочных грузов. Ротор напрессован на вал 2 без шпонки горячим способом. Вал опирается на два шариковых подшипника 3, вставленных в ступицу подшипниковых щитов. Подшипники снабжены двумя уплотнениями (серия 180000 ГОСТ 8882-2021) и не нуждаются в пополнении смазки в течение всего срока службы. Между щитом 4 и торцом наружного кольца шарикоподшипника установлена пружинная шайба, выполненная в виде волнистого кольца из листовой стали. Перемещая наружное кольцо подшипника в осевом направлении, пружинная шайба выбирает зазор в подшипнике и прижимает с определенным усилием

шарик к дорожке качения. Такое поджатие уменьшает шум подшипника, который возникает в результате ударов шариков о дорожки при наличии зазора, и увеличивает его долговечность. Кроме того, пружинная шайба компенсирует тепловое расширение вала, препятствуя тем самым заклиниванию подшипников в нагретой машине.

На выходном конце вала выполнен шпоночный паз, в который установлена шпонка 1. На вал посажен центробежный вентилятор 16 из полипропилена. Вентилятор имеет прямые лопатки и закрыт пластмассовым кожухом 15, который крепится винтами 13 к подшипниковому щиту 14. Кожух 15 имеет входные отверстия прямоугольной формы, через которые при вращении ротора вентилятор засасывает воздух, который при помощи кожуха направляется вдоль ребер станины. Двигатель имеет паспортную табличку 12 и заземляющий болт 18, вкрученный в станину.

Чертежи общего вида машины (продольный и поперечный разрезы) выполняются на одном или двух листах формата А1 в любом графическом редакторе. Следует отметить, что расчет и конструирование электрических машин неотделимы от технологии их изготовления. Поэтому при проектировании необходимо стремиться к максимальному снижению трудоемкости изготовления электрических машин.

4.11. Механический расчет

Для обеспечения требуемой прочности и жесткости вал выполнен из стали марки 45 (ГОСТ 380-2005).

Размеры вала определяем по чертежу разработанного АД. Для рассчитываемого двигателя его вал имеет следующие размеры (обозначения соответствуют рис. 3.16):

$$\begin{array}{ll} d_1 = 22 \text{ мм}; & a = 25 \text{ мм}; \\ d_2 = 25 \text{ мм}; & b = 44 \text{ мм}; \\ d_3 = 30 \text{ мм}; & x_1 = 19 \text{ мм}; \\ d_4 = 25 \text{ мм}; & x_2 = 85 \text{ мм}; \\ d_5 = 24 \text{ мм}; & y_1 = 19 \text{ мм}; \\ L = 170 \text{ мм}; & y_2 = 85 \text{ мм}. \end{array}$$

Выберем для рассчитываемого двигателя сопряжение с приводным механизмом посредством упругой муфты, которые сглаживают динамические нагрузки при запуске и остановке двигателя. Удары при колебаниях нагрузки амортизируются упругими резиновыми втулками 3, надетыми на стальные пальцы 2, которые позволяют передавать момент между полумуфтами 1 и 4 (рис. 4.8).

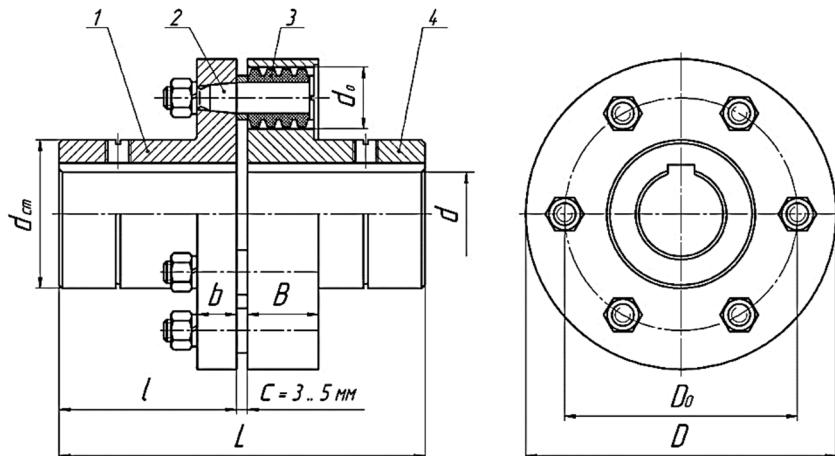


Рис. 4.8. Упругая втулочно-пальцевая муфта

Для диаметра выходного конца вала, равного 22 мм, выбираем муфту типа МУВП 63-22, имеющую массу $m_{\text{п}} = 2,14 \text{ кг}$ и $R = D/2 = 34 \text{ мм}$.

Расчет вала на жесткость

110. Сила тяжести (вес) ротора с валом по (3.134):

$$G_p = 64 \cdot D_2^2 \cdot l_2 = 64 \cdot 0,0875^2 \cdot 0,078 \cdot 10^3 = 38,2 \text{ Н.}$$

111. Реакция передачи по (3.135):

$$P_{\text{п}} = k_{\text{п}} \cdot M_{\text{п}} / R = 0,3 \cdot 7,16 / 0,034 = 63,2 \text{ Н,}$$

где $M_{\text{п}} = 9550 \cdot P_2 / n = 9550 \cdot 0,75 / 1000 = 7,16 \text{ Н}\cdot\text{м.}$

112. Прогиб вала под действием силы тяжести ротора по (3.136):

$$f_G = \frac{G_p}{2EL^2} (y_2^2 \cdot S_1 + x_2^2 \cdot S_2) = \\ = \frac{38,2}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,17^2} \cdot (0,085^2 \cdot 156,56 \cdot 10^2 + 0,085^2 \cdot 156,56 \cdot 10^2) = \\ = 0,48 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где $E = 2,06 \cdot 10^{11}$ Па – модуль упругости материала вала; S_1 и S_2 – вспомогательные параметры по (3.137):

$$S_1 = \sum_{i=1}^m \frac{x_i^3 - x_{i-1}^3}{I_i}; \quad S_2 = \sum_{i=1}^m \frac{y_i^3 - y_{i-1}^3}{I_i}.$$

Значения S_1 и S_2 определяются по табл. 4.4, где размеры x_i и y_i представляют собой расстояние от соответствующей опоры (подшипника) до рассматриваемого сечения вала (рис. 3.16).

Таблица 4.4

Левая часть вала между R_A и G_p								
d_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	I_i , $\text{м}^4 \cdot 10^{-8}$	x_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	$x^3 i$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$x^3 i - x^3 i-1$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$(x^3 i - x^3 i-1)/I_i$, м^{-1}	$x^2 i$, $\text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	$x^2 i - x^2 i-1$, $\text{м}^2 \cdot 10^{-4}$	$(x^2 i - x^2 i-1)/I_i$, м^{-2}
25	1,92	19	6,859	6,859	$3,6 \cdot 10^2$	3,61	3,61	$1,88 \cdot 10^4$
30	3,97	85	614,12	607,266	$152,96 \cdot 10^2$	72,25	8,64	$7,29 \cdot 10^4$
$S_1 = 156,56 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$					$S_0 = 19,17 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$			
Правая часть вала между R_B и G_p								
d_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	I_i , $\text{м}^4 \cdot 10^6$	y_i , $\text{м} \cdot 10^{-3}$	$y^3 i$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$y^3 i - y^3 i-1$, $\text{м}^3 \cdot 10^{-6}$	$(y^3 i - y^3 i-1)/I_i$, м^{-1}	$S_2 = 156,56 \cdot 10^2 \text{ м}^{-1}$		
25	1,92	19	6,859	6,859	$3,6 \cdot 10^2$			
30	3,97	85	614,12	607,266	$152,96 \cdot 10^2$			

113. Прогиб вала посередине сердечника ротора от реакции передачи:

$$f_n = \frac{P_n \cdot b}{3EL^2} [(1,5L \cdot S_0 - S_1) y_2 + x_2 S_2] = \\ \frac{63,2 \cdot 0,044}{3 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 0,17^2} [(1,5 \cdot 0,17 \cdot 19,17 \cdot 10^4 - 156,56 \cdot 10^2) 0,085 + \\ + 0,085 \cdot 156,56 \cdot 10^2] = 0,65 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где S_0 определяется по табл. 4.5.

114. Начальный расчетный эксцентриситет ротора, вызванный неточностью изготовления деталей двигателя и статическим прогибом от действия сил G_p и P_n по (3.140):

$$e_0 = k \cdot \delta + f_G + f_n = \\ = 0,15 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} + 0,48 \cdot 10^{-6} + 0,65 \cdot 10^{-6} = 38,6 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где $k = 0,15$ при $\delta < 0,5$ мм.

115. Начальная сила одностороннего магнитного притяжения, вызванная смещением ротора на e_0 по (3.141):

$$T_0 = k' \cdot D_2 \cdot l_2 \cdot e_0 \cdot 10^5 / \delta = \\ = 1,5 \cdot 0,0875 \cdot 0,078 \cdot 38,6 \cdot 10^{-6} \cdot 10^5 / 0,25 \cdot 10^{-3} = 158,1 \text{ Н},$$

где $k' = 1,5$ при $2p > 2$.

116. Прогиб вала под действием силы T_0 по (3.142):

$$f_T = f_G \frac{T_0}{G_p} = 0,48 \cdot 10^{-6} \frac{158,1}{38,2} = 1,99 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

117. Установившийся прогиб вала от одностороннего магнитного притяжения по (3.143):

$$f_y = \frac{f_T}{1 - \frac{f_T}{e_0}} = \frac{1,99 \cdot 10^{-6}}{1 - \frac{1,99 \cdot 10^{-6}}{38,6 \cdot 10^{-6}}} = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

118. Результирующий прогиб вала по (3.144):

$$f = f_G + f_{\pi} + f_y = \\ = 0,48 \cdot 10^{-6} + 0,65 \cdot 10^{-6} + 2,1 \cdot 10^{-6} = 3,25 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

что составляет 1,3 % величины воздушного зазора δ , что допустимо (допускается прогиб до 10%).

Определение критической частоты вращения

119. Прогиб вала от силы тяжести полумуфты по (3.145):

$$f_m = f_{\pi} \frac{G_{\pi}}{P_{\pi}} = 0,65 \cdot 10^{-6} \frac{10,5}{63,2} = 0,107 \cdot 10^{-6} \text{ м},$$

где $G_{\pi} = 9,81m_{\pi}/2 = 9,81 \cdot 2,14/2 = 10,5 \text{ Н}$ – сила тяжести полумуфты.

120. Критическая частота вращения вала по (3.146):

$$n_{kp} = 30 \sqrt{\frac{1 - f_T/e_0}{f_T + f_m}} = \\ = 30 \sqrt{\frac{1 - 1,99 \cdot 10^{-6}/38,6 \cdot 10^{-6}}{1,99 \cdot 10^{-6} + 0,107 \cdot 10^{-6}}} = 20175 \text{ об/мин.}$$

Полученное значение n_{kp} удовлетворяет неравенству $n_{kp} > 1,3 \cdot n_h$.

Расчет вала на прочность

Расчет вала на прочность проводится в наиболее опасном сечении I–I (рис. 3.16).

121. Расчетный диаметр выходного конца вала по (3.148):

$$d_o = d_1 - b_{sh,\pi} = 0,022 - 0,0025 = 0,0195 \text{ м},$$

где $b_{sh,\pi} = 0,0025 \text{ м}$ – глубина шпоночного паза, которая выбирается в зависимости от диаметра выходного конца вала по табл. 3.20.

122. Изгибающий момент в сечении 1-1 по (3.149):

$$M_n = k_M \cdot Z \cdot (P_n + G_n) = 2 \cdot 0,0645 \cdot (63,2 + 10,5) = 9,51 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где Z – расстояние от середины кулачков муфты до сечения 1-1, равное сумме длины L_n полумуфты и половины длины $l_{кул}$.

Для выбранной муфты типа МУВП63-22 имеем

$$Z = L_n / 2 + l_{кул} / 2 = 0,104 / 2 + 0,025 / 2 = 0,0645 \text{ м},$$

$k_M = 2$ – коэффициент перегрузки по моменту.

123. Момент сопротивления при изгибе в сечении 1-1 по (3.151):

$$W = 0,1 \cdot d_o^2 = 0,1 \cdot 0,0195^3 = 0,741 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

124. Эквивалентное напряжение при совместном действии изгиба и кручения по (3.152):

$$\begin{aligned} \sigma_{экв} &= \frac{1}{W} \sqrt{M_n^2 + (k_M \cdot \alpha \cdot M_n)^2} = \\ &= \frac{1}{0,741 \cdot 10^{-6}} \sqrt{9,51^2 + (2 \cdot 0,8 \cdot 7,16)^2} = 20,1 \cdot 10^6 \text{ Па}, \end{aligned}$$

где $\alpha = 0,6$ для реверсивных двигателей.

125. Коэффициента запаса прочности

$$k_{зап.i} = \sigma_t / \sigma_{экв} = 360,0 \cdot 10^6 / 20,1 \cdot 10^6 = 17,9.$$

Такой запас прочности вполне приемлем, так как $k_{зап.i} \geq 1,5$.

Расчет и выбор подшипников

126. Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник А со стороны выходного конца вала по (3.154):

$$\begin{aligned} R_A &= P_n \frac{L + b}{L} + (G_p + T_0) \frac{x_2}{L} = \\ &= 63,2 \frac{0,17 + 0,044}{0,17} + (38,2 + 158,1) \frac{0,085}{0,17} = 177,7 \text{ Н}. \end{aligned}$$

127. Наибольшая радиальная нагрузка на подшипник В по (3.155):

$$R_B = P_n \frac{b}{L} + (G_p + T_0) \frac{y_2}{L} = \\ = 63,2 \frac{0,044}{0,17} + (38,2 + 158,1) \frac{0,085}{0,17} = 114,5 \text{ Н.}$$

Выбираем однорядные радиальные шарикоподшипники. Принимаем, что двигатель будет иметь нагрузку со слабыми толчками, тогда коэффициент характера нагрузки $k_h = 1,5$; аксиальная нагрузка от приводного механизма отсутствует; расчетный срок службы подшипников $C_c = 12000$.

128. Динамическая приведенная нагрузка на подшипник А по (3. 156):

$$Q_A = k_h \cdot R_A = 1,5 \cdot 177,7 = 266,55 \text{ Н.}$$

129. Динамическая приведенная нагрузка на подшипник В по (3. 157):

$$Q_B = k_h \cdot R_B = 1,5 \cdot 114,5 = 171,75 \text{ Н.}$$

130. Динамическая грузоподъемность подшипника А по (3.158):

$$C_A = \frac{Q_A}{25,6} \sqrt[3]{C_c \cdot n} = \frac{266,55}{25,6} \sqrt[3]{12000 \cdot 1000} = 2384 \text{ Н.}$$

131. Динамическая грузоподъемность подшипника В по (3.159):

$$C_B = \frac{Q_B}{18,5} (C_c \cdot n)^{0,3} = \frac{171,75}{18,5} (12000 \cdot 1000)^{0,3} = 2125 \text{ Н.}$$

Выбираем при $d_1 = d_4 = 0,025$ м одинаковые с обеих сторон подшипники с двусторонним уплотнением легкой широкой серии 180505 (табл. П.7).

Вопросы и задания для самопроверки

1. Что влияет на выбор величины воздушного зазора? На каких параметрах машины оказывается выбор величины зазора?
2. Что характеризуют коэффициент укорочения и коэффициент распределения обмотки статора?
3. Что определяет обмоточный коэффициент?
4. В чем заключается влияние соотношения числа пазов Z_1/Z_2 на показатели машины?
5. Как проводится выбор системы и способа охлаждения?
6. Как оценивается работоспособность спроектированного АД?
7. Как проводится вентиляционный расчёт закрытых обдуваемых АД?
8. Как составляют аэродинамическую схему замещения электрических машин?
9. Объясните, в чем заключается принцип расчета параметров элементов, входящих в аэродинамическую схему замещения АД.
10. Какие типы вентиляторов применяются в электрических машинах?
11. Как производится расчет центробежного вентилятора?
12. В чем заключаются основные принципы теплового расчета АД?
13. Как проводится конструирование станины и вала АД?
14. Как проводится механический расчёт вала АД на прочность и жёсткость?
15. Какие существуют типы подшипников, как проводится конструирование подшипниковых узлов?
16. Расскажите, как проводится расчет и выбор подшипников.

Глава 5

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ РАЗМЕРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ МАШИН МАЛОЙ МОЩНОСТИ

5.1. Общие вопросы оптимизации электрических машин

Большинство расчетных методик, используемых при проектировании электрических машин, основано на использовании машинной постоянной Арнольда. Ориентируясь на допустимые значения электромагнитных нагрузок, она позволяет связать габаритные размеры проектируемой машины с расчетной мощностью. Ее также можно использовать для масштабирования электрической машины, используемой в качестве аналога. Определив зависимость машинной постоянной от расчетной мощности, можно получить хорошую базу для дальнейших расчетов конкретных машин. Но надо помнить, что машинная постоянная не является абсолютной константой, ее значение зависит не только от выбранных электромагнитных нагрузок, но и от уровня напряжения, типа изоляции, системы охлаждения, стоимости материалов, требований к надежности машины, капитальным и эксплуатационным затратам и т.д. Правда, для однотипных машин разброс значений не велик, но применение машинной постоянной отнюдь не означает получение одинаковых электрических машин всеми проектировщиками. Это хорошо, ведь в процессе проектирования можно получить множество вариантов электрической машины одной мощности с различными характеристиками, различающихся показателями качества. Тогда на первый план выходит задача оптимизации.

Проектирование электрической машины можно представить в виде расчета зависимостей между заданными величинами и основными показателями машины. Правда, формализовать эти зависимости в виде ряда аналитических формул как правило не удается. В процессе проектирования часто приходится пользоваться эмпирическими коэффициентами, графическими зависимостями, что не позволяет выстроить линейную модель, пригодную для автоматического расчета вариантов.

В классической постановке задача однокритериальной оптимизации формулируется следующим образом: для заданных констант и ограничений необходимо выбрать независимые переменные таким образом, чтобы показатель качества имел минимальное или максимальное значение. Независимыми переменными часто являются размеры, которые однозначно определяют геометрию машины. Если при поиске оптимума изменяются все независимые переменные, то решается самая сложная задача полной габаритной оптимизации. Но на практике часто возникают ситуации, при которых некоторые размеры или группа размеров являются заданными величинами. Например, заданы могут быть наружный или внутренний диаметр, габариты машины. Это упрощает задачу.

К сожалению, задача оптимального проектирования электрической машины усложняется невозможностью выбора лишь одного критерия оптимальности. Так, качество спроектированного асинхронного двигателя определяется не только высоким коэффициентом полезного действия, но и коэффициентом мощности, кратностью максимального момента, кратностями пускового момента и пускового тока. Для некоторых применений асинхронных двигателей на первый план выходят другие показатели, вроде нелинейности механической характеристики для исполнительных двигателей. Вообще же, расширенный список показателей может включать удельную мощность, производственные затраты (себестоимость изделия), эксплуатационные затраты, надежность, ремонтопригодность, срок службы, экологичность производства и самого изделия (затраты на утилизацию), вибро-акустические показатели.

Решение многокритериальной задачи представляет собой большую сложность. Имеющиеся программные средства для проведения оптимизации предполагают использование простых аналитических моделей, допускающих расчет большого числа вариантов за ограниченное время, что неизбежно ограничивает достоверность полученных результатов. Тем не менее, существует множество публикаций, посвященных оптимальному проектированию электрических машин, использующих разные подходы

и ориентированных на различные области применения электрических машин. В [11] описан алгоритм оптимизации неявнополюсных асинхронных двигателей малой мощности. В нем в качестве независимых переменных приняты следующие величины:

– отношение внутреннего и наружного диаметров сердечника статора

$$k_D = \frac{D}{D_h};$$

– удельный объем активных материалов

$$V_{уд} = \frac{\pi D_h^2 l_s}{4P_h};$$

– относительная площадь пазов статора

$$k_{zs} = \frac{4S_{ns}Z_s}{\pi D_h^2(1 - k_D^2)};$$

– относительная площадь пазов ротора

$$k_{zr} = \frac{4S_{nr}Z_r}{\pi D^2};$$

– относительная высота паза статора

$$\bar{h}_{ns} = \frac{h_{ns}}{D};$$

– относительная высота паза ротора

$$\bar{h}_{nr} = \frac{h_{nr}}{D};$$

– номинальное скольжение s_h ;

– коэффициент трансформации k (отношение чисел витков фаз двигателя с двухфазной обмоткой).

Для определения независимых переменных используются следующие значения: D – внутренний диаметр статора; D_n – наружный диаметр статора; l_s – длина сердечника статора; P_n – номинальная мощность двигателя; S_{ns} , S_{nr} – площадь паза статора, площадь паза ротора; Z_s , Z_r – число зубцов (пазов) статора, число зубцов ротора; h_{ns} , h_{nr} – высота паза статора, высота паза ротора.

Все эти величины являются относительными, что позволяет обобщить опыт проектирования машин определенного типа и сузить диапазон изменения независимых переменных, упростив задачу оптимизации. Кроме того, выбранные величины могут быть использованы для определения относительных параметров схемы замещения с целью оценки эксплуатационных характеристик параметрическим методом.

В качестве ограничителей используются кратность пускового момента k_p , кратность пускового тока k_i , кратность максимального момента k_M .

Некоторые ограничители зависят от свойств и характеристик применяемых материалов. К ним относятся допустимые превышения температуры обмоток и подшипников, напряжение на конденсаторе для конденсаторного электродвигателя.

Ряд ограничителей обусловлен принятой технологией. Среди них – минимальная ширина зубца статора и ротора, минимальная высота паза ротора, минимальный диаметр закругления нижней части паза ротора.

5.2. Обобщенный опыт проектирования асинхронных двигателей малой мощности

Авторы книг по проектированию электрических машин формируют свои рекомендации на основе обобщения опыта проектирования и данных выпускаемых машин, а также на основе закономерностей электромеханического преобразования энергии. Такое обобщение позволяет сузить зону поиска оптимального

варианта и ускорить его получение. Конечно, рекомендации всегда носят ориентировочный характер и полученные по ним значения требуют анализа и возможной корректировки.

Как уже отмечалось, в [11] приведены обобщенные сведения по выпускавшимся асинхронным двигателям малой мощности (до 500 Вт), имеющим как трехфазные, так и однофазные модификации. Здесь рассматриваются машины с распределенной обмоткой статора и короткозамкнутым ротором.

На первом этапе проектирования при выборе основных размеров целесообразно проанализировать обобщенные сведения о зависимости энергетических показателей КПД и $\cos\varphi$ от номинальной полезной мощности P_h , удельного активного объема машины от номинальной мощности P_h и электромагнитных нагрузок (индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки A) от отношения номинальной мощности к синхронной частоте вращения P_h/n_c .

Поскольку асинхронные двигатели одного габарита могут проектироваться на работу от трехфазной или однофазной сети, удобно использовать при проектировании однофазных двигателей понятие эквивалентной расчетной мощности трехфазного двигателя:

$$P'_{III_{EKB}} = \beta_s P'_s,$$

где $P'_s = \frac{k_E P_h}{\eta \cos\varphi}$ – расчетная мощность проектируемого однофазного двигателя, $k_E = E/U$, коэффициент $\beta_s = \beta_1 \cdot \beta_2$ учитывает соотношение мощностей и энергетических показателей трехфазного и проектируемого однофазного двигателя:

$$\beta_1 = \frac{P_{hIII}}{P_h};$$

$$\beta_2 = \frac{\eta \cos\varphi}{\eta_{III} \cos\varphi_{III}}.$$

Для оценки энергетических показателей используется единый коэффициент – энергетический КПД двигателя, равный произведению КПД на коэффициент мощности. Для выпускаемых конденсаторных двигателей коэффициент $\beta_1 = 1,25\dots1,7$ (для серий 4А и АИ диапазон значений меньше – $\beta_1 = 1,33\dots1,55$); для двигателей с пусковыми элементами $\beta_1 = 2,0\dots2,8$ (для серий 4А и АИ – $\beta_1 = 2,0\dots2,1$). Для трехфазных двигателей $\beta_S = \beta_1 \cdot \beta_2 = 1$.

При выборе главных размеров однофазного двигателя вначале задаются значением β_1 и рассчитывают соответствующую номинальную мощность эквивалентного трехфазного двигателя

$$P_{\text{нIII}} = \beta_1 P_{\text{n}} .$$

Затем определяют величину эквивалентной расчетной мощности

$$P'_{\text{нIIIэкв}} = \frac{k_E P_{\text{нIII}}}{\eta_{\text{III}} \cos \varphi_{\text{III}}} .$$

Величину энергетического КПД трехфазного асинхронного двигателя $\eta_{\text{III}} \cos \varphi_{\text{III}}$ в зависимости от мощности определяют по рис. 5.1. Коэффициент k_E равен 0,9…0,97.

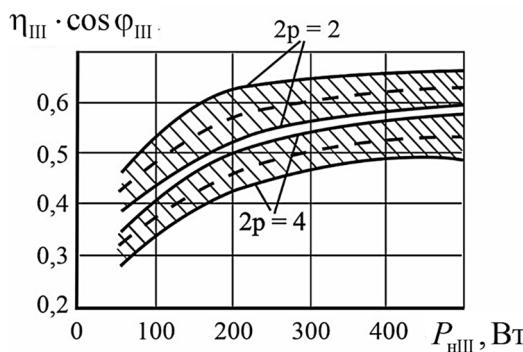


Рис. 5.1. Зависимость энергетического КПД от номинальной мощности трехфазного асинхронного микродвигателя

Выбор электромагнитных нагрузок – индукции B_δ и линейной нагрузки A – проводят с учетом того, что они характеризуют использование магнитной системы и обмоток. От них также зависят рабочие и пусковые свойства двигателя. На практике у асинхронных двигателей малой мощности индукция находится в пределах от 0,5 до 1 Тл, линейная нагрузка двухполюсных машин $(0,9 \dots 1,8) \cdot 10^4$ А/м, четырехполюсных – $(0,9 \dots 2,0) \cdot 10^4$ А/м. На выбор конкретных значений влияет мощность двигателя, класс нагревостойкости изоляции, марка стали. Большие значения A и B_δ позволяют уменьшить размеры двигателя, но увеличение индукции ограничивается насыщением зубцов и ярем, увеличение линейной нагрузки ограничивается классом нагревостойкости изоляции и интенсивностью охлаждения.

Для двигателей серии 4А и АИ соответствующие данные приведены на рис. 5.2.

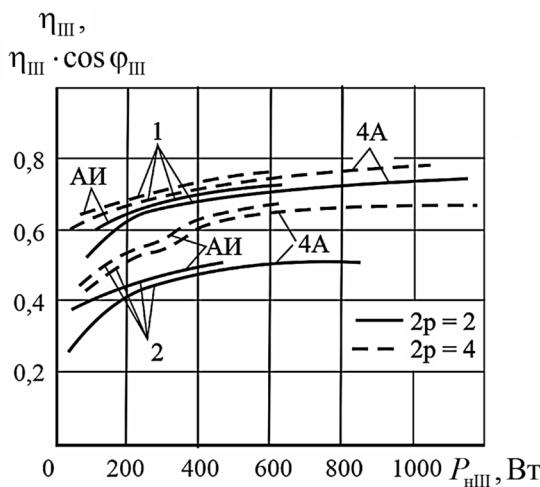


Рис. 5.2. Зависимость КПД (1) и энергетического КПД (2) асинхронных микродвигателей серии 4А и АИ от номинальной мощности

В машинах малой мощности часто приходится выбирать небольшие значения A и B_δ , в результате в машине получается небольшой магнитный поток и, следовательно, большое число витков обмотки статора. Укладка в пазы малых размеров большого числа

тонких проводников ухудшает использование площади пазов из-за относительно большой площади, занимаемой изоляцией. Это заставляет уменьшать число проводников, снижая линейную нагрузку. При этом зубцы статора получаются относительно узкими и для понижения индукции в них также снижают B_δ . Правда, микромашины отличаются улучшенным теплоотведением вследствие относительно большой площади охлаждающей поверхности, что позволяет повышать плотность тока, сохраняя неизменным произведение AB_δ .

Окончательно основные размеры машины (здесь и далее все размеры в сантиметрах) определяются по формулам:

$$D = 100 \sqrt[3]{\frac{P_{\text{IIIЭКВ}}}{\Omega_c AB_\delta \lambda}};$$

$$D_h = \frac{D}{k_D};$$

$$l_s = D\lambda.$$

Для этого необходимо также задаться конструктивными коэффициентами λ и k_D . Отношение длины сердечника статора к его внутреннему диаметру λ колеблется в диапазоне 0,22...1,57. Оптимальное значение отношения внутреннего диаметра сердечника статора к наружному диаметру k_D у двухполюсных двигателей составляет 0,485...0,565, у четырехполюсных – 0,59...0,66.

Полученную величину наружного диаметра сердечника D_h следует округлить с учетом условий оптимального раскроя рулонной стали, а также учесть его связь с наружным диаметром корпуса двигателя.

При предварительном выборе главных размеров можно пользоваться также данными об удельном активном объеме машины, который является одним из важных показателей ее технического уровня:

$$V_{\text{уд}} = \frac{\pi D_h^2 l_s}{4 P_h}.$$

Проанализировав данные выпускаемых асинхронных конденсаторных микродвигателей авторы [11] обнаружили, что для различных по конструкции и назначению двигателей их удельные объемы для одинаковой полезной мощности отличаются сравнительно мало. В диапазоне мощностей до 100 Вт с помощью метода наименьших квадратов получены аппроксимирующие зависимости $V_{\text{уд}} = f(P_{\text{н}})$.

Для двухполюсных конденсаторных двигателей можно использовать полином:

$$V_{\text{уд}} = 2,29 + \frac{59,48}{P_{\text{н}}} - \frac{77,77}{P_{\text{н}}^2} + \frac{40,48}{P_{\text{н}}^3} + \frac{2,29}{P_{\text{н}}^4}.$$

Для четырехполюсных конденсаторных двигателей:

$$V_{\text{уд}} = 2,50 + \frac{113,66}{P_{\text{н}}} - \frac{204,34}{P_{\text{н}}^2} + \frac{121,52}{P_{\text{н}}^3} + \frac{2,50}{P_{\text{н}}^4}.$$

При мощностях более 100 Вт эти формулы дают завышенные результаты.

Выбрав величину относительного объема рассчитывают наружный диаметр как:

$$D_{\text{н}} = \sqrt{\frac{4P_{\text{н}}V_{\text{уд}}}{\pi k_{ls}}},$$

где $k_{ls} = l_s/D_{\text{н}}$ – отношение длины сердечника статора к его наружному диаметру.

У большинства асинхронных микродвигателей коэффициент k_{ls} находится в пределах 0,415...0,67, универсальные асинхронные двигатели отличаются значениями $k_{ls} = 0,43...0,35$.

Часто техническое задание четко определяет допустимое значение наружного диаметра, что позволяет уточнить выбор коэффициента k_{ls} . Если же наружный диаметр не регламентируется, рекомендуется рассчитать несколько вариантов двигателя с разными значениями k_{ls} из диапазона.

При выборе воздушного зазора δ с одной стороны учитывается необходимость его минимизации для уменьшения намагничивающего тока и улучшения коэффициента мощности, с другой – усложнение и повышение стоимости изготовления двигателя с малым воздушным зазором. Для трехфазных двигателей зазор (мм) рассчитывают ориентировочно по эмпирической формуле:

$$\delta = 0,2 + \frac{D}{900},$$

где D – внутренний диаметр сердечника статора, см.

В первом приближении эта формула дает удовлетворительный результат для однофазных двигателей с подшипниками качения. Величину зазора выбирают кратной 0,05 мм. В двигателях малой мощности $\delta = 0,2 \dots 0,3$ мм, реже 0,35 мм.

5.3. Оптимальные размеры зубцовой зоны

Стремление получать машины с высоким использованием активных материалов, в частности, с высокой индукцией в воздушном зазоре, приводит к необходимости оптимизации зубцовой зоны статора и ротора. Повышение индукции в воздушном зазоре приводит к насыщению зубцов и ярем сердечников, а, следовательно, к увеличению намагничивающего тока и потерь в стали. Рациональный выбор размеров ширины зубца и высоты спинки листов статора и ротора позволяет снизить относительную величину намагничивающего тока, коэффициент насыщения и потери в стали микродвигателей. Использование высококачественных стальей также благоприятно сказывается на величине намагничивающего тока.

Для решения задачи оптимизации размеров пазов статора и ротора авторы [11] вводят следующие конструктивные коэффициенты:
– отношение внутреннего и внешнего диаметров листа статора

$$k_D = \frac{D}{D_h};$$

– относительная площадь пазов статора

$$k_{zs} = \frac{S_{ns} Z_s}{\pi D^2 \left(\frac{1}{k_D^2} - 1 \right)};$$

– относительная площадь пазов ротора

$$k_{zr} = \frac{S_{nr} Z_r}{\pi D^2 / 4},$$

где S_{ns} , S_{nr} – площади пазов статора и ротора; Z_s , Z_r – число зубцов статора и ротора.

Выбор этих коэффициентов при проектировании выполняется на основе анализа существующих машин. Использование относительных единиц упрощает обобщение данных машин различной мощности и разной полюсности. На рисунках 5.3 и 5.4 приведены гистограммы конструктивных коэффициентов для асинхронных микродвигателей общего и бытового назначения.

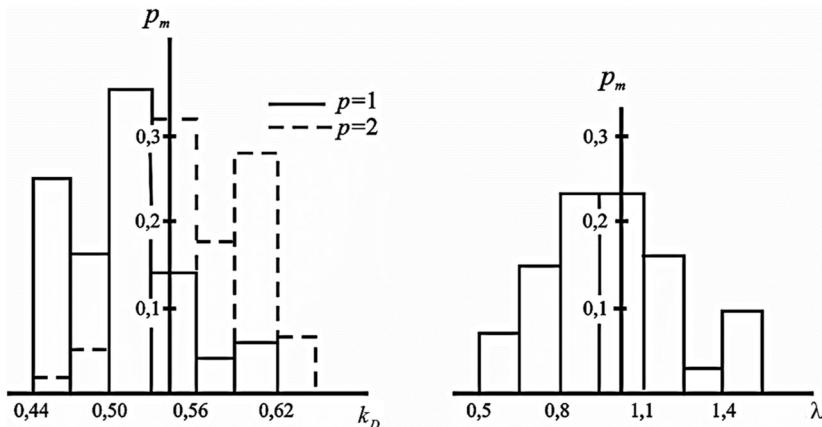


Рис. 5.3. Гистограммы коэффициентов k_D и λ

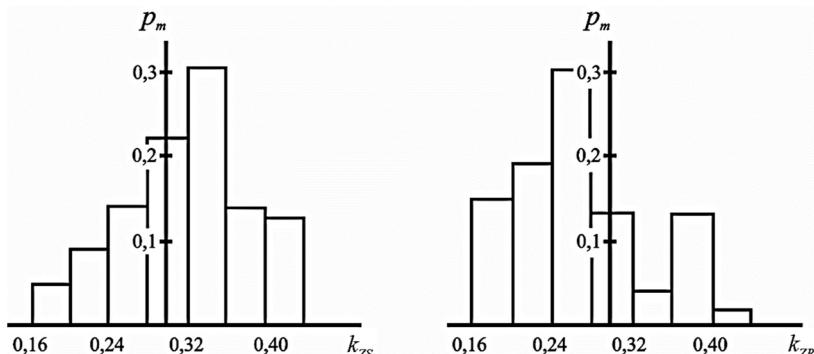


Рис. 5.4. Гистограммы коэффициентов k_{zs} и k_{zr}

По оси ординат на гистограммах отложена частотность p_m , характеризующая относительное число двигателей, имеющих то или иное значение относительного коэффициента из представленных интервалов. Частотность p_m определяется как отношение числа электродвигателей n_m , приходящихся на m -й интервал значений соответствующего коэффициента, к общему числу рассмотренных двигателей n (объем выборки). Для ранжирования коэффициентов k_D и λ рассмотрено от 30 до 60 двигателей (меньшее число для четырехполюсных двигателей), относительные площади пазов статора и ротора рассчитаны для 150 и 110 двигателей соответственно.

Значения конструктивных коэффициентов оказывают влияние на относительные параметры схемы замещения и через них на характеристики машины. От них зависит расход обмоточной меди и алюминия, другие экономические показатели, а также значения индукций в зубцах и спинках сердечников. Оптимальные значения конструктивных коэффициентов могут быть выбраны только на основе оптимизационных расчетов.

Для облегчения этой задачи удобно использовать понятия идеализированных пазов, площадь которых связана с площадью реальных пазов с помощью следующий коэффициентов:

$$k_{zs} = \frac{S_{\text{пS}}}{S_{\text{пS.ид}}} ; \quad k_{zR} = \frac{S_{\text{пR}}}{S_{\text{пR.ид}}} .$$

Идеализированные пазы имеют простую трапециoidalную форму открытых пазов, предусматривающую зубцы с параллельными стенками. Идеализированные пазы статора и ротора показаны на рис. 5.5. и 5.6. Размеры идеализированных пазов простой формы легко варьировать в процессе оптимизации, а затем выбранный вариант легко превратить в реальные пазы.

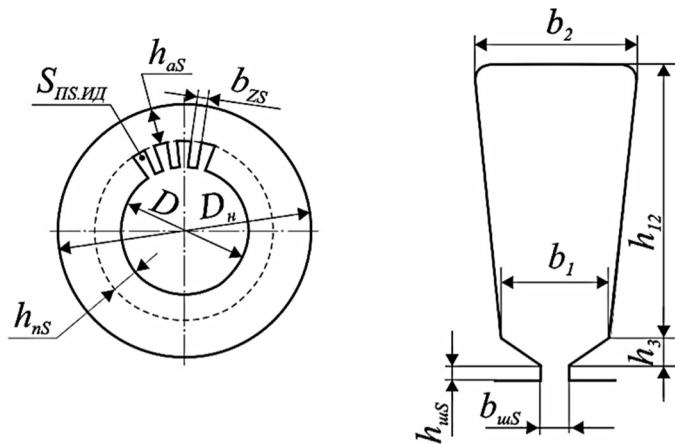


Рис. 5.5. Идеализированный лист статора и реальная форма паза

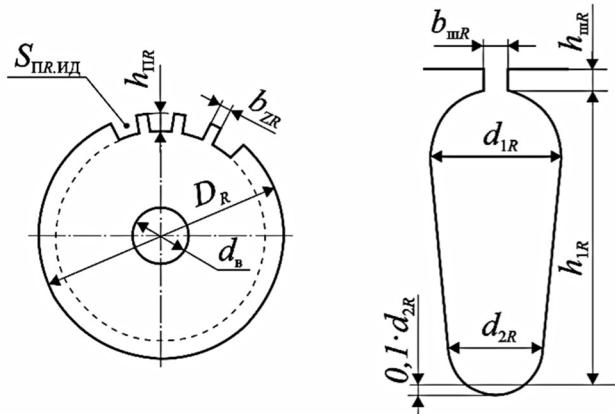


Рис. 5.6. Идеализированный лист ротора и реальная форма паза

Уравнение, связывающее основные величины, которые определяют геометрию листа статора, можно получить, записав суммарную площадь пазов статора для зубцов с параллельными стенками в виде:

$$S_{ns}Z_s = k_{ss} \left[\frac{\pi}{4} \left((D_h - 2h_{as})^2 - D^2 \right) - \frac{1}{2} Z_s b_{zs} (D_h - 2h_{as} - D) \right].$$

Магнитные потоки полюса и зубца определяются соответственно по формулам:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_\delta \frac{\pi D}{2p} l_s = 2h_{as} l_s k_c B_{as};$$

$$\Phi_z = \frac{\pi D}{Z_s} B_\delta l_s = B_{zs} b_{zs} l_s k_c.$$

Высота спинки статора и ширина зубца соответственно равны:

$$h_{as} = \frac{D}{2pk_c \chi_a}; \quad b_{zs} = \frac{\pi D}{Z_s k_c \chi_z}.$$

В приведенных выше формулах используются следующие обозначения: B_δ , B_{as} , B_{zs} – индукции в воздушном зазоре, в спинке и зубцах статора; l_s – длина сердечника статора; k_c – коэффициент заполнения сердечника сталью; $\chi_a = B_{as} / B_\delta$, $\chi_z = B_{zs} / B_\delta$ – относительные значения индукции в спинке и в зубцах статора.

Эти выражения позволяют получить уравнение, связывающее конструктивные коэффициенты k_D и k_{zs} статора с относительным значением индукций χ_a и χ_z :

$$(1 - k_D)k_{zs} = k_{ss} \left[\left(1 - \frac{k_D}{pk_c \chi_a} \right)^2 - k_D^2 \right] - \frac{2k_D}{k_c \chi_z} \left(1 - \frac{k_D}{pk_c \chi_a} - k_D \right).$$

Аналогичное уравнение может быть получено и для ротора. Такие уравнения могут быть использованы для решения различных оптимизационных задач. Например, для статора:

- заданы значения k_{zs} и k_D исходя из условия получения определенного относительного активного сопротивления обмотки статора. Требуется найти относительные индукции χ_a и χ_z и проверить выполнение условия $B_{zs} \leq B_{zs\text{дон}}$;
- заданы k_D , χ_a и χ_z . Требуется найти относительную площадь пазов статора;
- заданы k_D , высота ярма статора и ширина зубца исходя из технологических соображений. Требуется найти k_{zs} и проверить по χ_z индукцию в зубцах.

Если при решении этих задач неизвестно соотношение между χ_a и χ_z , то можно принять $\chi_a = \chi_z = \chi$ при $2p \geq 4$ и $\chi_z = 1,25$, $\chi_a = \chi$ при $2p = 2$. С помощью полученного уравнения надо построить семейства вспомогательных кривых при характерных значениях χ для разных чисел полюсов и решать задачи графически.

Практический интерес представляет решение задачи определения соотношений высоты и ширины пазов при заданных значениях конструктивных коэффициентов k_D , k_{zs} , k_{zr} , исходя из условия минимального падения магнитного напряжения в зубцах и спинке статора F_S (и ротора F_R).

Для обобщения результатов на ряд машин различной мощности все размеры листов берутся в относительных единицах:

- средняя ширина паза статора и ротора

$$\bar{b}_{ns} = \frac{k'_{zs} \left(\frac{1}{k_D^2} - 1 \right)}{4\bar{h}_{ns}};$$

$$\bar{b}_{nr} = \frac{k'_{zr}}{4\bar{h}_{nr}};$$

– ширина зубца статора и ротора

$$\bar{b}_{zs} = 1 + \bar{h}_{ns} - \bar{b}_{ns}; \\ \bar{b}_{zr} = \bar{D}_r - \bar{h}_{nr} - \bar{b}_{nr};$$

– высота спинки сердечника статора и ротора

$$\bar{h}_{as} = 0,5 \left(\frac{1}{k_D - 1} \right) - \bar{h}_{ns}; \\ \bar{h}_{ar} = \frac{2 + p}{3,2p} \left(\frac{\bar{D}_r}{2} - \bar{h}_{nr} \right);$$

– средняя длина линии поля в спинке статора и ротора

$$\bar{L}_{as} = \frac{\pi}{2p} \left(\frac{1}{k_D} - \bar{h}_{ns} \right); \\ \bar{L}_{ar} = \frac{\pi}{2p} \left(\bar{D}_r - 2\bar{h}_{nr} - \bar{h}_{ar} \right).$$

$$\text{При этом } \bar{h}_{ns(r)} = \frac{h_{ns(r)}}{D}, \quad \bar{b}_{ns(r)} = \frac{b_{ns(r)} Z_{s(r)}}{\pi D}, \quad \bar{h}_{as(r)} = \frac{h_{as(r)}}{D}, \\ \bar{b}_{zs(r)} = \frac{b_{zs(r)} Z_{s(r)}}{\pi D}, \quad \bar{L}_{as(r)} = \frac{L_{as(r)}}{D}, \quad k'_{zs} = \frac{k_{zs}}{k_{ns}}, \quad k'_{zr} = \frac{k_{zr}}{k_{nr}}, \\ \bar{D}_r = 1 - \frac{2\delta}{D}.$$

Величины относительных магнитных напряжений статора и ротора определяются соответственно по формулам:

$$\bar{F}_s = \frac{F_s}{D} = 2\bar{h}_{ns} H_{zs} + \bar{L}_{as} H_{as}; \\ \bar{F}_r = \frac{F_r}{D} = 2\bar{h}_{nr} H_{zr} + \bar{L}_{ar} H_{ar}.$$

По относительным значениям \bar{F}_s и \bar{F}_r можно найти коэффициент насыщения k_μ для конкретной машины, у которой известны внутренний диаметр статора D , воздушный зазор δ и индукция B_δ

$$k_\mu = 1 + \frac{D(\bar{F}_s + \bar{F}_r)}{1,6\delta k_\delta B_\delta \cdot 10^4}.$$

Значения \bar{F}_s и \bar{F}_r при заданном числе пар полюсов p являются в общем случае функциями четырех и трех переменных:

$$\begin{aligned}\bar{F}_s &= f(B_\delta, \bar{h}_{nS}, k_{zs}, k_D); \\ \bar{F}_r &= f(B_\delta, \bar{h}_{nR}, k_{zR}).\end{aligned}$$

При неизменной величине магнитной индукции в зазоре B_δ и постоянных конструктивных коэффициентах k_D , k_{zs} и k_{zR} с увеличением высоты паза зубец становится шире, а высота ярма меньше, что приводит к росту магнитного напряжения ярма и снижению магнитного напряжения зубца. В результате зависимости полной относительной МДС статора и ротора \bar{F}_s и \bar{F}_r от относительной высоты соответствующего паза имеют явновыраженный минимум. Оптимальная высота паза статора и ротора и соответствующее им магнитное напряжение являются соответственно функциями трех и двух переменных:

$$\begin{aligned}\bar{h}_{nS}, \bar{F}_{s\text{опт}} &= f(B_\delta, k_{zs}, k_D); \\ \bar{h}_{nR}, \bar{F}_{r\text{опт}} &= f(B_\delta, k_{zR}).\end{aligned}$$

Решение задачи такого типа проводится на компьютере, а обобщение результатов решения достигается с помощью методов планирования эксперимента.

В [11] приведены полиномиальные зависимости оптимальных величин высоты паза статора \bar{h}_{nS} и высоты паза ротора \bar{h}_{nR} от конструктивных коэффициентов и индукции в воздушном зазоре, полученные с помощью полнофакторного эксперимента:

$$\begin{aligned}\bar{h}_{nS} &= b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \\ \bar{h}_{nR} &= b_0 + b_1y_1 + b_3y_3 + b_{13}y_1y_3.\end{aligned}$$

Независимые переменные в нормализованном виде имеют вид: $x_1 = \frac{k'_{zs} - 0,3}{0,2}$, $x_2 = \frac{k_D - 0,55}{0,1}$, $x_3 = \frac{B_\delta - 0,8}{0,2}$, $y_1 = \frac{k'_{zr} - 0,3}{0,2}$, $y_3 = \frac{B_\delta - 0,8}{0,2}$.

Пределы варьирования величин независимых переменных выбраны на основании предварительного статистического анализа данных 150 асинхронных микродвигателей и составляют соответственно: $k'_{zs} = 0,1 \dots 0,5$; $k'_{zr} = 0,1 \dots 0,5$; $k_D = 0,45 \dots 0,65$; $B_\delta = 0,6 \dots 1,0$ Тл. Соотношения площадей реальных и идеальных пазов равны $k_{zs} = 0,82 \dots 0,94$ и $k_{zr} = 0,76 \dots 0,91$.

Полиному оптимальных размеров получены для двух- и четырехполюсных двигателей при различных марках стали. Они линейны и имеют хорошую адекватность ($\pm 0,5\%$). Коэффициенты регрессии b_x для всех искомых величин приведены в табл. 5.1.

Зависимости в виде полиномов удобны для расчетов и наглядно показывают влияние на оптимальную высоту паза отдельных независимых переменных. Анализируя коэффициенты регрессии, можно обратить внимание, что коэффициенты b_3 , b_{13} , b_{23} и b_{123} на порядок меньше других. Это свидетельствует о том, что оптимальная высота паза практически не зависит от индукции в воздушном зазоре. Таким образом, оптимальные относительные высоты пазов определяются фактически лишь конструктивными коэффициентами k_z и k_D .

Исходя из полученных по полиномам оптимальных значений \bar{h}_{nS} и \bar{h}_{nR} определяют все размеры реальных листов статора и ротора.

Таблица 5.1

Коэффициенты регрессии полиномов для оптимальных размеров паза

Марка стали	Величина	$2p$	b_0	b_1	b_2	b_3	b_{12}	b_{13}	b_{23}	b_{123}
2013	\bar{h}_{nS}	2	0,2050	0,095	-0,0975	0	-0,0375	-0,0050	-0,0025	0,0025
	\bar{h}_{nR}	2	0,200	0,080	—	-0,0050	—	0,0150	—	—
	\bar{h}_{nS}	4	0,2390	0,094	-0,1060	-0,0060	-0,0300	-0,0090	-0,0090	-0,0060
	\bar{h}_{nR}	4	0,2125	0,082	—	-0,0025	—	-0,0225	—	—
1213	\bar{h}_{nS}	2	0,190	0,072	-0,1125	-0,005	-0,23	-0,0022	-0,0033	0,0044
	\bar{h}_{nR}	2	0,185	0,090	—	-0,010	—	-0,0310	—	—
	\bar{h}_{nS}	4	0,239	0,077	-0,1150	0,010	-0,067	-0,0067	-0,0100	0,0267
	\bar{h}_{nR}	4	0,225	0,120	—	0,020	—	0	—	—

5.4. Пример выбора оптимальных размеров асинхронного конденсаторного двигателя

В качестве примера рассмотрим начальную часть проектного расчета асинхронного конденсаторного двигателя с распределенной обмоткой, который должен отвечать следующим требованиям:

- номинальная полезная мощность $P_{\text{н}} = 120 \text{ Вт}$;
- синхронная частота вращения $n_c = 3000 \text{ об/мин}$;
- число фаз обмотки статора $m = 2$, соединение обмоток фаз – параллельное;
- частота сети $f = 50 \text{ Гц}$;
- номинальное напряжение $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$;
- кратности максимального и начального пускового моментов $k_{\max} \geq 1,6$ и $k_{\text{п}} \geq 0,4$;
- кратность начального пускового тока $k_I \leq 5$;
- высота оси вращения $H = 56 \text{ мм}$;
- режим работы – продолжительный S_1 ;
- климатическое исполнение и категория размещения – УЗ;
- исполнение по способам защиты и охлаждения IP44 и IC0140 (с наружным обдувом и естественным теплообменом внутри закрытой полости машины).

В соответствии с приведенными в параграфе 5.3 рекомендациями для заданных требований выберем следующие значения независимых переменных:

- отношение внутреннего диаметра сердечника статора к его наружному диаметру $k_D = 0,545$;
- удельный объем активных материалов $V_{\text{уд}} = 2,44 \text{ см}^3/\text{Вт}$;
- относительная площадь пазов статора $k_{ZS} = 0,2$;
- относительная площадь пазов ротора $k_{ZR} = 0,266$.

5.4.1. Основные размеры

Для заданной высоты оси вращения $H = 56 \text{ мм}$ наружный диаметр сердечника статора примем $D_{\text{н}} = 8,9 \text{ см}$ (все линейные размеры здесь приведены в сантиметрах поскольку в [11] расчетные формулы и графики используют величины в сантиметрах).

Длина сердечника статора:

$$l_s = \frac{4V_{\text{уд}} P_{\text{n}}}{\pi D_{\text{n}}^2} = 4,7 \text{ см.}$$

Внутренний диаметр сердечника статора:

$$D = D_{\text{n}} k_D = 4,85 \text{ см.}$$

Длина сердечника ротора:

$$l_r = l_s + (0...0,3) .$$

Примем $l_r = 4,7$ см.

Полученный по эмпирической формуле зазор скорректируем до широко применяемого в микродвигателях значения $\delta = 0,025$ см.

5.4.2. Зубцовая зона статора и ротора

Число пар полюсов:

$$p = \frac{60f}{n_c} = 1 .$$

Число пазов на полюс и фазу стремятся выбрать как можно больше, при условии, что общее число пазов поместится на внутренней поверхности статора при достаточной ширине зубца. В нашем случае можно взять $q = 6$, число пазов статора $Z_s = 2pmq = 24$, соответствующее число пазов ротора выбираем $Z_r = 18$.

Для проектируемого микродвигателя выберем однослойную катушечную обмотку. Обмоточный коэффициент двухфазной однослойной обмотки с диаметральным шагом:

$$k_o = k_p = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} = \frac{\sin \frac{\pi}{2 \cdot 2}}{6 \sin \frac{\pi}{2 \cdot 2 \cdot 6}} = 0,903 .$$

Зубцовые деления статора и ротора соответственно:

$$t_{zs} = \frac{\pi D}{Z_s} = 0,635 \text{ см};$$

$$t_{zr} = \frac{\pi(D - 2\delta)}{Z_r} = 0,836 \text{ см}.$$

Скос пазов на роторе обычно делается на одно зубцовое деление статора или меньше:

$$\beta_{ck} = \frac{b_{ck}}{t_{zr}} \leq \frac{Z_r}{Z_s}, \text{ принимаем } \beta_{ck} = \frac{Z_r}{Z_s} = \frac{18}{24} = 0,75.$$

Коэффициент скоса:

$$k_{ck} = \frac{\sin \frac{\pi p \beta_{ck}}{Z_r}}{\frac{\pi p}{Z_r} \beta_{ck}} = 0,997.$$

Размеры шлица паза статора:

$$b_{ws} = 0,12 \dots 0,25; \quad h_{ws} = 0,05 \dots 0,12.$$

После выбора проводов ширина шлица уточняется с учетом диаметра изолированного провода $d_{из}$: $b_{ws} = d_{из} + (0,1 \dots 0,21)$

Размеры шлица паза ротора:

$$b_{wr} = 0,08 \dots 0,15; \quad h_{wr} = 0,04 \dots 0,1.$$

Для рассматриваемого двигателя примем $b_{ws} = 0,18 \text{ см}$, $b_{ws} = 0,05 \text{ см}$, $b_{wr} = 0,1 \text{ см}$, $h_{wr} = 0,05 \text{ см}$.

Коэффициент воздушного зазора статора и ротора:

$$k_{\delta S} = \frac{5 + \frac{b_{mS}}{\delta}}{5 + \frac{b_{mS}}{\delta} \frac{t_{zs} - b_{mS}}{t_{zs}}} = 1,183 ;$$

$$k_{\delta R} = \frac{5 + \frac{b_{mR}}{\delta}}{5 + \frac{b_{mR}}{\delta} \frac{t_{zr} - b_{mR}}{t_{zr}}} = 1,05 .$$

Относительные размеры зубцовой зоны статора:

– высота паза

$$\bar{h}_{nS} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 = 0,176 ;$$

– ширина зубца

$$\bar{b}_{zs} = 1 - \frac{1,15 k_{zs} \left(\frac{1}{k_D^2} - 1 \right)}{4 \bar{h}_{nS}} + \bar{h}_{nS} = 0,391 ,$$

где

$$x_1 = \frac{k'_{zs} - 0,3}{0,2} = \frac{1,15 k_{zs} - 0,3}{0,2} = -0,333 \quad , \quad x_2 = \frac{k_D - 0,55}{0,1} = -0,051$$

(коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_{12} берутся для стали 2013).

Относительные размеры зубцовой зоны ротора:

– высота паза

$$\bar{h}_{nR} = b_0 + b_1 y_1 = 0,208 ;$$

– ширина зубца

$$\bar{b}_{zR} = 1 - \frac{1,2 k_{zR}}{4 \bar{h}_{nR}} - \bar{h}_{nR} = 0,408 ,$$

$$\text{где } y_1 = \frac{k'_{zR} - 0,3}{0,2} = \frac{1,2 k_{zR} - 0,3}{0,2} = 0,096 .$$

Размеры зубцовой зоны статора (расчетная высота паза и ширина зубца):

$$h'_{ns} = \bar{h}_{ns} D = 0,853 \text{ см}; \\ b_{zs} = \bar{b}_{zs} t_{zs} = 0,248 \text{ см.}$$

В случае овального паза реальная высота паза определяется как $h_{ns} = h'_{ns} + 0,1d_2$, для остальных пазов $h_{ns} = h'_{ns}$.

Большая ширина овального паза равна (рис. 5.7, а):

$$d_2 = \frac{\pi(D + 2h_{ns}) - b_{zs}Z_s}{Z_s + 0,8\pi}; \quad h_{ns} = h'_{ns} + 0,1,$$

а полуовального и трапецидального пазов равна (рис. 5.7, б и в):

$$b_2 = \frac{\pi(D + 2h_{ns})}{Z_s} - b_{zs} = 0,61 \text{ см},$$

Меньшая ширина овального и полуовального пазов равна (рис. 5.7 а и б):

$$d_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ns}) - b_{zs}Z_s}{Z_s - \pi} = 0,436 \text{ см},$$

а трапецидального паза равна (рис. 5.7, в):

$$b_1 = \frac{\pi(D + 2h_{ns} + 2h_3)}{Z_s} - b_{zs}.$$

Здесь $h_3 = 0,06 \dots 0,25$.

Высота ярма статора:

$$h_{as} = \frac{D_u - D}{2} - h_{ns} = 1,172 \text{ см.}$$

Значения b_{zs} и h_{as} обычно ограничиваются по технологическим соображениям. Так, для двигателей общепромышленного назначения при автоматизированном изготовлении выбирают $b_{zs} \geq 0,3$ см, $h_{as} \geq 0,35$ см. Если первое условие не выполняется, то надо увеличить h_{ns} . Если не выполняется второе условие, то надо уменьшить h_{ns} . Если же не выполнены оба условия, то необходимо уменьшить k_{zs} или число пазов на полюс и фазу q .

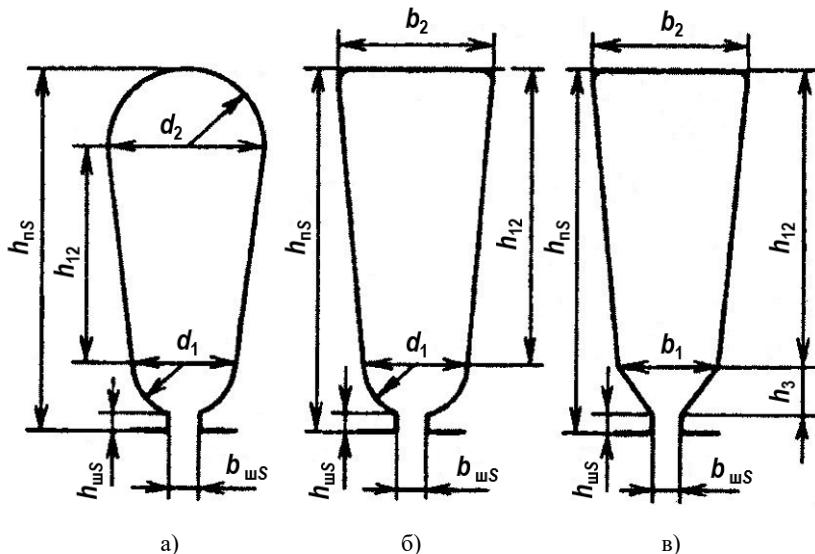


Рис. 5.7. Пазы статора: овальный (a); полуовальный (б); трапецидальный (в)

Размеры зубцовой зоны ротора для овального паза принимаются следующими (рис. 5.8, ε):

$$h'_{nR} = \bar{h}_{nR} D = 1,01 \text{ см}, b_{ZR} = \bar{b}_{ZR} t_{ZR} = 0,341 \text{ см};$$

$$d_{1R} = \frac{\pi(D - 2h_{nR} - 2\delta) - b_{ZR} Z_R}{Z_R + \pi} = 0,402 \text{ см};$$

$$d_{2R} = \frac{\pi(D - 2h_{nR} - 2\delta) - b_{ZR} Z_R}{Z_R - 0,8\pi} = 0,148 \text{ см};$$

$$h_{nR} = h'_{nR} + 0,1d_{2R} = 1,16 \text{ см}.$$

Для круглого паза (рис. 5.8, б):

$$d_R = \sqrt{\frac{D^2 k_{ZR}}{Z_R} - \frac{4 h_{mR} b_{mR}}{\pi}}.$$

По технологическим соображениям необходимо соблюдать следующие ограничения: $b_{ZR} \geq 0,15$ см, $\frac{D - d_b}{2} - \delta - h_{mR} - 0,1 d_{2R} \geq 0,2$ см

(где d_b – диаметр вала), $d_{2R} \geq 0,1$ см.

Если не выполняется первое условие, то необходимо увеличить \bar{h}_{mR} . В случае, когда не выполняются второе и третье условия, нужно уменьшить \bar{h}_{mR} . Если не выполнено одновременно первое и второе условия (или первое и третье), то надо уменьшить k_{ZR} или число пазов ротора Z_R .

Площадь паза статора определяется по следующим формулам:

- для овального паза (рис. 5.7, а)

$$S_{nS} = \frac{\pi}{8} (d_1^2 + d_2^2) + 0,5(d_1 + d_2)(h_{nS} - h_{mS} - 0,5d_1 - 0,4d_2);$$

- для полуовального паза (рис. 5.7, б)

$$S_{nS} = \frac{\pi}{8} d_1^2 + 0,5(d_1 + b_2)(h_{nS} - h_{mS} - 0,5d_1);$$

$$S_{nS} = 0,37 \text{ см}^2;$$

- для трапецидального паза (рис. 5.7, в)

$$S_{nS} = 0,5(b_1 + b_{mS})h_3 + (b_1 + b_2)(h_{nS} - h_{mS} - h_3).$$

Относительная площадь пазов равна:

$$k_{zs} = \frac{4S_{nS} Z_s}{\pi(D_h^2 - D^2)} = 0,203.$$

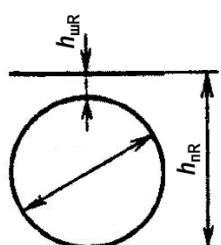
Площадь пазов ротора рассчитывается по следующим формулам:
 – для круглого паза (рис. 5.8, б)

$$S_{\text{пR}} = \frac{\pi}{4} d_R^2 + h_{\text{шR}} b_{\text{шR}};$$

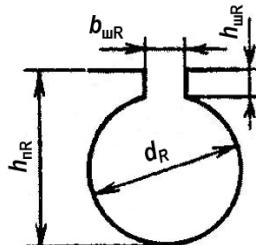
– для овального паза (рис. 5.8, г)

$$S_{\text{пR}} = \frac{\pi}{8} (d_{1R}^2 + d_{2R}^2) + 0,5(d_{1R} + d_{2R})(h_{\text{пR}} - h_{\text{шR}} - 0,5d_{1R} - 0,4d_{2R});$$

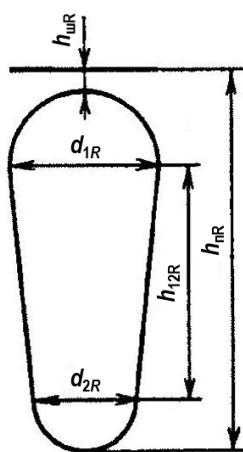
$$S_{\text{пR}} = 0,273 \text{ см}^2.$$



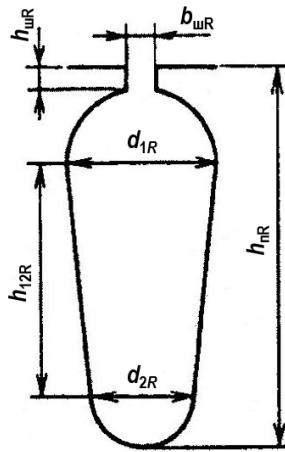
а)



б)



в)



г)

Рис. 5.8. Пазы ротора: круглый закрытый (а); круглый полузакрытый (б);
 овальный закрытый (в); овальный полузакрытый (г)

Относительная площадь пазов ротора равна:

$$k_{ZR} = \frac{4S_{nR}Z_R}{\pi D^2} = 0,266 .$$

Размеры короткозамыкающего кольца «беличьей клетки»: осевой размер – $b \approx d_{1R} + (0,05...0,93)$, радиальный размер – $a \approx h_{nR} + (0,05...0,4)$.

Примем $a = 1,2$ см, $b = 0,87$ см.

Коэффициент, учитывающий влияние сопротивления короткозамыкающих колец:

$$k_R = 1 + \frac{\pi D_{kl} S_{nR}}{2abl_R Z_R \sin^2 \frac{\pi p}{Z_R}} = 1,58 ,$$

где D_{kl} – средний диаметр кольца (в примере $D_{kl} = D - 2\delta - a = 3,6$ см).

Средняя длина лобовой части обмотки статора l_l зависит от типа обмотки и оценивается традиционным способом.

В примере $l_l = 9,35$ см.

Коэффициент, учитывающий сопротивление лобовых частей обмотки статора:

$$k_s = 1 + \frac{l_l}{l_s} = 2,99 .$$

Далее можно продолжить расчет по традиционной методике для асинхронных машин, находя параметры машины и проводя поверочный расчет для построения рабочих и пусковых характеристик.

Вопросы и задания для самопроверки

1. В чем заключается задача однокритериальной оптимизации электрической машины?
2. В чем заключаются особенности многокритериальной задачи оптимизации?
3. Какие параметры выбирают в качестве независимых переменных при оптимизации АД?
4. Какие параметры выбирают в качестве ограничителей при оптимизации?
5. Какой параметр удобно использовать при оптимизационном проектировании однофазных двигателей?
6. Укажите основные критерии выбора электромагнитных нагрузок (индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузки A) с учетом отношения номинальной мощности к синхронной частоте вращения P_n/n_c .
7. В чем заключается принцип оптимизации размеров зубцовой зоны статора и ротора?
8. Какие конструктивные коэффициенты используют при решении задачи оптимизации размеров пазов статора и ротора?
9. Какие оптимизационные задачи решаются при проектировании АД малой мощности?
10. Как вычисляют основные размеры активных частей АД?
11. Перечислите принципы оптимизации зубцово-пазовых зон статора и ротора.

Глава 6

УТОЧНЕННЫЙ РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИНАХ С ПОМОЩЬЮ ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

6.1. Потери в электрических машинах

К числу ограничений, которые необходимо соблюдать при создании электрических машин, наряду с максимальными допустимыми механическими и электрическими напряжениями относятся предельные допустимые температуры активных частей. По этой причине общему прогрессу электромашиностроения всегда сопутствует процесс совершенствования методик оценки теплового состояния электрической машины.

При электромеханическом преобразовании энергии часть потребляемой энергии всегда преобразуется в тепловую. Разность между потребляемой электрической машиной энергией и отдаваемой называют потерями.

Потери в машине в зависимости от вызывающих их физических процессов подразделяют на электрические, магнитные, механические, вентиляционные и добавочные (или дополнительные). Каждый вид потерь локализован в определенных участках объема машины: электрические потери – в проводниках обмоток, соединительных проводах и в скользящих контактах (щетки–коллектор или щетки–контактные кольца); магнитные потери, включающие потери на вихревые токи и гистерезис, – в стали участков магнито-проводка с переменным магнитным потоком; механические потери, включающие потери на трение в подшипниках, на трение вращающихся частей машины о воздух или газ и трение щеток о контактные кольца, – соответственно в подшипниках, на поверхностях вращающихся деталей, коллекторов или контактных колец. Вентиляционные потери непосредственного влияния на нагрев машины не оказывают, так как энергия, затрачиваемая на вентиляцию,

преобразуется не в тепловую, а в кинетическую энергию движения охлаждающего газа. В двигателях на вентиляцию расходуется часть электромагнитной энергии, передаваемой от статора машины к ротору, поэтому вентиляционные потери увеличивают потребляемую мощность.

Дополнительные потери подразделяют на дополнительные потери холостого хода и дополнительные потери короткого замыкания. Первые включают поверхностные и пульсационные потери, возникающие от пульсаций индукции в зазоре электрической машины. Потери этого вида имеют место как при холостом ходе машины, так и при ее работе с нагрузкой. Дополнительные потери короткого замыкания возникают лишь при нагрузке машины. К ним относят потери в проводниках обмотки, обусловленные высшими гармоническими полями в машине, не учтенные в расчете других видов потерь. Расчет дополнительных потерь короткого замыкания в настоящее время наименее точен по сравнению с расчетом других видов потерь. ГОСТ IEC 60034-2-1-2017 предписывает учитывать этот вид потерь в размере 0,5% потребляемой мощности при нагрузке машины.

Потери и характер их распределения в объеме машины формируют ее температурное поле. Темпера, созданная потерями, нагревает активные и конструктивные элементы двигателя, повышая тем самым их температуру. Чрезмерное повышение температуры может вызвать в электрической машине снижение электрической и механической прочности изоляции обмоток.

6.2. Процессы нагрева и охлаждения электрических машин

Правильный расчет мощности двигателя основывается на знании процессов его нагревания и охлаждения при различных режимах работы. Рассмотрим тепловые процессы, протекающие в электрической машине при работе с постоянной нагрузкой.

Условия нагревания отдельных частей электрической машины, несущих на себе изоляцию, различны: большие нагреваются части обмотки, находящиеся внутри машины. Непостоянным

является и направление тепловых потоков внутри машины: при холостом ходе тепло передается от более нагретой стали двигателя к менее нагретой меди обмоток, а при нагрузке медь обмоток обычно нагревается сильнее стали двигателя, и тепло передается в обратном направлении. Однако указанные явления не учитываются при тепловых расчетах, а двигатель рассматривается как однородное сплошное тело, которое обладает очень большой теплопроводностью и поэтому нагревается равномерно по всему объему. Допускают также, что температура окружающей среды во все время изменения температуры двигателя остается неизменной. Кроме того, условимся о том, что теплоотдача во внешнюю среду считается пропорциональной первой степени разности температур.

В начале работы двигателя температура его остается равной температуре окружающей среды. Затем все выделяемое тепло начинает полностью поглощаться только двигателем. Вследствие поглощения двигателем тепла температура его начинает повышаться. Если бы тепло, выделяемое в меди обмоток и стали двигателя, шло только на нагревание двигателя и двигатель не охлаждался, то его температура повышалась бы непрерывно. В действительности же с появлением превышения температуры двигателя над температурой среды часть тепла будет поглощаться окружающей средой, а другая часть по-прежнему, будет повышать среднюю температуру двигателя.

При некоторой разности температур наступает состояние теплового равновесия, когда при данной неизменной нагрузке прекращается повышение температуры двигателя; двигатель сохраняет постоянную установившуюся температуру, соответствующую этой нагрузке, и все выделяемое в нем тепло передается в окружающую среду. Эта установившаяся разность температур есть максимальная разность между температурами двигателя и среды.

Количество тепла, выделяемое в двигателе в единицу времени, определяется величиной потерь мощности. Чем выше нагрузка двигателя, тем при более высокой установившейся температуре он будет работать.

Итак, определенной нагрузке двигателя при определенных условиях охлаждения соответствует своя максимально возможная установившаяся температура. Этой температуры двигатель достигает при состоянии теплового равновесия, когда выделившееся в двигателе тепло полностью рассеивается в окружающее пространство.

Допустимый нагрев электрических двигателей зависит от класса изоляции обмоток. Переход на более высокий класс изоляции электродвигателя может быть осуществлен только при капитальном ремонте. Необходимо знать, что с повышением температуры обмоток электродвигателей сверх допустимых значений, резко сокращается срок службы изоляции.

Нагрев электрической машины определяется не только потерями, но и температурой окружающей среды. Поэтому тепловое состояние машины оценивают по превышению температуры ее частей над температурой окружающего воздуха, которая принимается равной 40°C. ГОСТ IEC 60034-1-2014 устанавливает предельно допустимое превышение температуры обмоток в зависимости от типа машины и класса нагревостойкости их изоляции.

При повышении температуры окружающего воздуха выше 40°C нагрузка на электродвигатель должна быть снижена настолько, чтобы температура отдельных его частей не превышала допустимых значений. Независимо от снижения температуры окружающего воздуха увеличивать токовые нагрузки более чем на 10% номинального не допускается.

6.3. Допустимая температура частей электрической машины

Особенностью электрических машин является тесное конструктивное сочетание металлов и изоляции, т.е. материалов, имеющих резко различные тепловые характеристики. В то время как металлы сохраняют свои рабочие свойства при температурах до 400...500°C и выше, верхний предел допустимого нагрева изоляционных материалов, применяемых в электромашиностроении, в зависимости от класса их нагревостойкости составляет 90...180°C.

В настоящее время в электрических машинах применяются изоляционные материалы классов нагревостойкости Е, В и F (ГОСТ 8865-93). Материалы класса Н используются значительно реже; материалы классов нагревостойкости Y и A в современных электрических машинах практически не применяются. В последние годы разработаны изоляционные материалы с допустимой рабочей температурой 200...240 °C, но они находят применение лишь в машинах специального назначения.

Диэлектрические свойства изоляционных материалов с течением времени ухудшаются. При длительной эксплуатации изоляция усыхает, уменьшается ее механическая прочность, снижается пробивное напряжение. Этот процесс называют старением изоляции. Интенсивность старения во многом зависит от температуры. Чем выше рабочая температура, тем быстрее происходит старение и уменьшается срок службы изоляции. При нормировании допустимого нагрева частей электрической машины исходят из того, чтобы соприкасающаяся с ними или расположенная в непосредственной близости от них изоляция могла выполнять свои функции в течение расчетного срока эксплуатации машины. Поэтому предельно допустимый нагрев частей электрической машины зависит от класса нагревостойкости изоляции.

Допустимая температура сердечников и других стальных частей, соприкасающихся с изолированными обмотками, не должна превышать допустимый нагрев изоляции этих обмоток, а превышение температуры указанных частей в том случае, если они не соприкасаются с изолированными обмотками, не должно достигать значений, которые создавали бы опасность повреждения самих элементов или соседних частей.

Допустимая температура подшипников машины независимо от температуры охлаждающей среды не должна превышать 80°C для подшипников скольжения (температура масла при этом не должна быть более 65°C) и 100°C для подшипников качения. Более высокая температура допускается только при применении специальных подшипников. Допустимая температура нагрева корпуса электрической машины указывается в её паспорте.

6.4. Основные способы передачи теплоты

В основе тепловых расчетов электрических машин лежит теория теплопередачи, основной задачей которой является расчет температурных полей. В различных частях электрических машин в процессе их работы формируются температурные поля, зависящие от условия выделения тепловой энергии в виде потерь и от условий отвода этой энергии из машины. Процесс переноса теплоты в системе физических тел называется теплообменом. Теплообмен вызывается неравномерностью распределения температуры в данной системе тел, т.е. обусловлен характером ее температурного поля. Теплообмен в общем случае может осуществляться следующими способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопроводность – это процесс передачи тепловой энергии от более нагретых частей тела к менее нагретым в результате непосредственного взаимодействия частиц (молекул, атомов, электронов) в их тепловом движении или при непосредственном соприкосновении тел.

Передача тепла путем теплопроводности в электрических машинах происходит главным образом внутри твердых тел (медь, сталь, изоляция), в то время как в газах (воздух, водород) и жидкостях (масло, вода) главное значение имеет передача тепла конвекцией. Интенсивность теплопереноса в этом случае характеризуется коэффициентом теплопроводности, который определяется свойствами вещества (химическим составом и т.п.), структурой и параметрами его состояния (температурой, давлением).

Лучистый теплообмен – это преобразование внутренней энергии тела в энергию теплового излучения электромагнитных волн, которая затем поглощается другими телами. При обычных температурах имеет место невидимое инфракрасное излучение. Интенсивность излучения зависит от физических свойств, состояния и температуры поверхности.

Конвекция – это теплоперенос путем перемещения некоторых объемов (макрообъемов) жидкости или газа из более нагретой области пространства в менее нагретую. Таким образом, конвективный теплоперенос тесно связан с массопереносом и сопровождается теплопроводностью между соседними макрообъемами.

Различают *естественную* (свободную) и *вынужденную конвекцию*. При естественной конвекции течение среды обусловлено меньшей плотностью более нагретых объемов и их поднятием в поле сил тяготения по закону Архимеда: частицы жидкости или газа, соприкасающиеся с нагретым телом, нагреваются, становятся легче и вследствие этого поднимаются кверху, уступая свое место другим, еще не нагретым частицам, которые в свою очередь, нагреваясь, поднимаются кверху и т. д.

При вынужденной конвекции течение среды вызывается действием вентилятора, насоса и т. п. или движущимися частями машины. Для более интенсивного отвода тепла обычно применяют обдув внутренних, а иногда и внешних поверхностей электрических машин воздухом.

Усиление теплоотдачи при искусственной конвекции происходит в разной степени в зависимости от равномерности обдува, формы обдуваемых поверхностей и т. д.

В большинстве случаев на нагрев частей электрических машин преобладающее влияние оказывают условия теплоотдачи с их поверхностей охлаждения. Расчет теплового потока Q , т.е. тепловой энергии, отводимой за 1 секунду с некоторого участка поверхности площадью S , выполняют по формуле Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha S (t^0 - t_{\circ}^0),$$

где α – опытный коэффициент, называемый коэффициентом теплоотдачи (КТО); t^0 и t_{\circ}^0 – температура соответственно теплоотдающей поверхности и охлаждающей жидкой или газообразной среды.

Эта формула отражает известный из опыта факт, что при охлаждении нагретой поверхности тепловая энергия, отдаваемая ею в единицу времени, пропорциональна площади этой поверхности и превышению ее температуры над температурой охлаждающей среды. Коэффициент пропорциональности этой зависимости

является коэффициентом теплоотдачи α и показывает, какая мощность (Вт) теплового потока отводится с 1 м² поверхности на один градус превышения температуры.

Значения α для электрических машин с воздушным охлаждением обычно лежат в пределах 8...20 Вт/м²·град при естественной конвекции и от нескольких десятков до сотен – при искусственной. Коэффициент теплоотдачи имеет первостепенное значение при расчете температурных полей и вообще в тепловых расчетах.

Теплопередачей называется процесс, в котором участвуют, как правило, все три вида теплообмена, но в конкретных условиях может преобладать только один из них. В электрических машинах условия рассеяния тепла лучеиспусканием и конвекцией для различных поверхностей различны. В современных вентилируемых машинах отвод тепла путем искусственной конвекции настолько преобладает над отводом тепла лучеиспусканием, что последний обычно не учитывают.

6.5. Метод эквивалентных тепловых схем замещения

В первом приближении для оценки нагрева электрическую машину можно представить как однородное тело с источниками тепла (потерями), равномерно распределенными внутри его объема.

Точный расчет нагрева электрических машин требует решения трехмерного температурного поля, осложненного неравномерным распределением источников тепла в объеме машины, различными тепловыми характеристиками элементов машины, существенно зависящими от технологии изготовления машины и системы охлаждения. Такой расчет для инженерной практики мало приемлем. Поэтому воспользуемся методом эквивалентных тепловых схем замещения (ЭТСЗ), который позволяет выполнить расчет температур основных узлов машины с максимальной достоверностью. В основе этого метода лежит аналогия тепловых и электрических процессов, основанная на единой форме

описывающих их уравнений, т.е. уравнения теплообмена (закона Фурье) и уравнения электрической цепи (закона Ома):

$$\Delta\theta = Q \cdot \frac{l}{\lambda \cdot S_{\pi}} = Q \cdot R_T ; \quad \Delta U = I \cdot \frac{l}{\gamma \cdot S} = I \cdot R_{\text{ЭЛ}} ,$$

где $\Delta\theta$ – падение температуры (т.е. разность температур) по длине l ; Q – тепловой поток; λ – коэффициент теплопроводности; S_{π} – площадь теплопередающей поверхности, перпендикулярная направлению Q ; ΔU – падение напряжения (т.е. разность электрических потенциалов) по длине l ; I – электрический ток; γ – удельная электрическая проводимость; S – сечение проводника; R_T и $R_{\text{ЭЛ}}$ – тепловое и электрическое сопротивления.

Метод ЭТСЗ основан на условном подразделении всего объема машины на ряд зон, обладающих постоянными в пределах каждой зоны тепловыми характеристиками (коэффициентом теплопроводности материала, отсутствием или наличием источников тепла и т. п.). На границах зон определяются условия теплопередачи, устанавливаются возможные направления тепловых потоков и для каждого из выбранных направлений рассчитываются тепловые сопротивления R_T в пределах зоны и на ее границах. При расчете тепловых сопротивлений учитывают теплопроводность λ материала в направлении теплового потока Q , размеры зоны, условия теплопередачи с поверхности, характер и скорость движения, соприкасающегося с зоной охлаждающего газа или жидкости, их теплоемкость, состояние охлаждающей поверхности и другие факторы, оказывающие влияние на процессы теплопередачи.

Для составления тепловой схемы замещения необходимо предварительно определить все источники тепловыделения и возможные направления тепловых потоков от этих источников к поверхностям охлаждения. Электрическая машина разбивается на отдельные элементы, которые изображаются на ЭТСЗ в виде узлов, содержащих источник тепла, мощность которого равна потерям в этом элементе. При этом некоторые узлы могут и не быть источниками тепла, например, станина. Узлы соединяются между собой

ветвями, содержащими тепловые сопротивления, по которым протекают тепловые потоки. При этом действительные распределенные тепловые сопротивления заменяют сосредоточенными, которые не зависят от величины теплового потока. Таким образом, получаем ЭТСЗ, имитирующую реальные пути теплообмена в машине. Отметим, что чем на большее количество элементов разбита машина, тем более точно может быть рассчитано ее температурное поле. Но при этом увеличивается количество узлов в ЭТСЗ, что приводит к усложнению вычислений. Поэтому целесообразное количество элементов выбирается в каждом конкретном случае в зависимости от типа и конструкции машины, при этом источники тепловыделения должны быть учтены все без исключения. В отличие от электрических цепей, ЭТСЗ часто изображают разомкнутыми.

Таким образом, в соответствие с методом ЭТСЗ электрическую машину условно разделяем на n однородных элементов с внутренними источниками тепла мощностью P_1, P_2, \dots, P_n (равными потерям в этих элементах) и с температурами $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ соответственно. Эти элементы связаны между собой тепловыми сопротивлениями $R_{12}, R_{13}, \dots, R_{1n}, R_{21}, \dots, R_{2n}, \dots, R_{n(n-1)}$ и образуют, таким образом, эквивалентную тепловую схему. Для такой схемы, согласно закону теплопроводности Фурье, можно записать систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} (\theta_1 - \theta_2)R_{12}^{-1} + (\theta_1 - \theta_3)R_{13}^{-1} + \dots + (\theta_1 - \theta_n)R_{1n}^{-1} = P_1 \\ (\theta_2 - \theta_1)R_{21}^{-1} + (\theta_2 - \theta_3)R_{23}^{-1} + \dots + (\theta_2 - \theta_n)R_{2n}^{-1} = P_2 \\ (\theta_3 - \theta_1)R_{31}^{-1} + (\theta_3 - \theta_2)R_{32}^{-1} + \dots + (\theta_3 - \theta_n)R_{3n}^{-1} = P_3 \\ \dots \\ (\theta_n - \theta_1)R_{n1}^{-1} + (\theta_n - \theta_2)R_{n2}^{-1} + \dots + (\theta_n - \theta_{n-1})R_{n(n-1)}^{-1} = P_n \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, можно по известным значениям тепловых сопротивлений R_n и потерям P_n найти температуру θ_n каждого элемента.

6.6. Тепловая схема замещения асинхронных двигателей

Тепловая схема замещения представляет собой картину распределения внутренних источников теплоты, температур и основных тепловых связей. В проектируемом асинхронном двигателе со степенью защиты IP44 и способом охлаждения IC0141 тепловые потоки распространяются в следующих направлениях.

1. Тепловой поток пазовой части обмотки статора передается лобовым частям (тепловое сопротивление $R_{\text{пл}}$), зубцам и спинке сердечника статора (тепловые сопротивления $R_{\text{пз}}$ и $R_{\text{пс}}$).

2. Тепловой поток пазовой части обмотки ротора через ротор и воздушный зазор передается зубцам статора (тепловое сопротивление $R_{\text{ст.р}}$).

3. Тепловые потоки от ротора и пазовой части обмотки статора складываются с тепловым потоком, возникающим от потерь в зубцах P_{z1} и спинке P_{c1} статора, и через тепловые сопротивления R_{zc} и $R_{c,\text{стан}}$ передаются станине.

4. Тепловые потоки с лобовых частей обмотки статора через тепловое сопротивление $R_{\text{л.ст}}$ и от торцевых частей ротора через тепловое сопротивление $R_{\text{рот.в}}$ передаются внутреннему воздуху, а затем через тепловые сопротивления $R_{\text{стан.}i}$ и $R_{\text{щ.}i}$ также передаются станине.

5. Тепловой поток с поверхности станины передается охлаждающему воздуху (тепловые сопротивления $R_{\text{щ.о}}$ и $R_{\text{стан.о}}$).

Тогда с учетом распространения тепловых потоков ЭТСЗ асинхронного двигателя будет иметь вид, приведенный на рис.6.1.

Тепловая схема замещения состоит из семи узлов, соответствующих различным частям машины:

1) пазовая часть обмотки статора с потерями $P_{m1\text{п}}$ и средней температурой $\theta_{\text{п1}}$;

2) лобовая часть обмотки статора с потерями $P_{m1\text{l}}$ и средней температурой $\theta_{\text{л1}}$;

3) зубцы статора с потерями P_{z1} и средней температурой θ_{z1} ;

4) спинка статора с потерями P_{c1} и средней температурой θ_{c1} ;

5) ротор с потерями P_p и средней температурой θ_p ;

6) станина и подшипниковые щиты (корпус двигателя) с потерями $P_{\text{мех.}i}$ и средней температурой $\theta_{\text{стан}}$;

7) внутренний воздух с потерями $P_{v,i} = 0$ и средней температурой $\theta_{v,i}$.

6.7. Термический расчет асинхронного двигателя по эквивалентной тепловой схеме замещения

Уточненный термический расчет асинхронного двигателя по эквивалентной тепловой схеме замещения позволяет определить, как было сказано выше, нагрев любого узла машины. Проведем термический расчет АД по схеме, показанной на рис. 6.1. Для удобства практического использования методики расчета совместим ее с примером расчета электродвигателя типа 4A80A6, расчет которого выполнен в главе 4. За базу принятая методика расчета, предложенная в [8]. Исходные данные приведены в табл. 6.1 и 6.2.

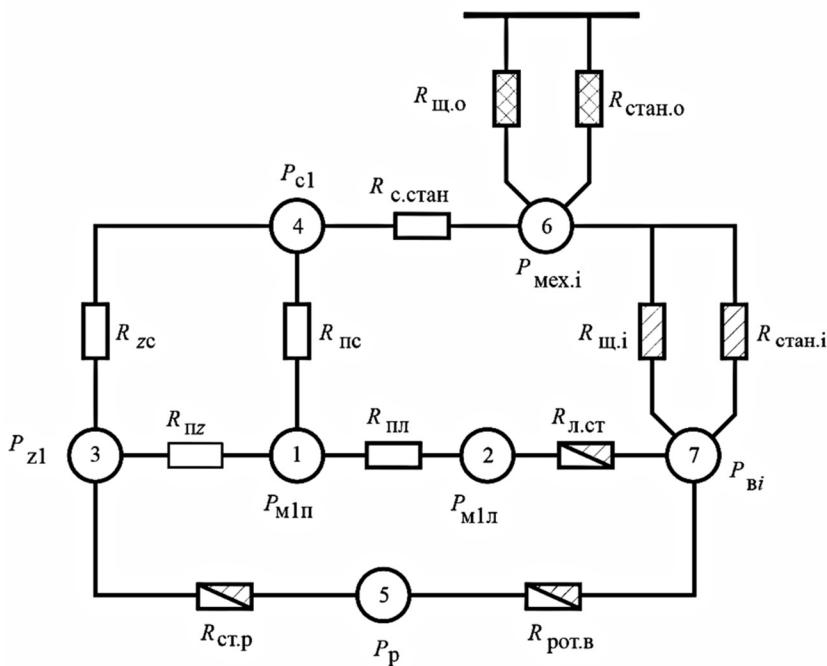


Рис. 6.1. Эквивалентная тепловая схема замещения АД:

- а) — сопротивление теплообмену теплопроводностью;
- б) — сопротивление теплообмену конвекцией;
- в) — сопротивление теплообмену теплопроводностью и конвекцией;
- г) — сопротивление теплообмену конвекцией и излучением

Таблица 6.1

Геометрические размеры и обмоточные данные

№	Наименование параметра	Обозначение параметра	Численное значение
Пакет статора:			
1	– наружный диаметр пакета	D_1	131 мм
	– внутренний диаметр пакета	D	88 мм
	– длина пакета	L_1	78 мм
	– число пазов	Z_1	36
	– средняя ширина паза	$b_{\text{п.ср}}$	5,0 мм
	– высота зубца	h_{z1}	13,4 мм
	– ширина зубца	b_{z1}	4,0 мм
Обмотка статора:			
2	– число эффективных проводников в пазу	$N_{\text{п}}$	82
	– число элементарных проводников в эффективном	$n_{\text{эл}}$	1
	– сечение проводника обмотки статора	$q_{\text{пр}}$	0,302 мм^2
	– длина лобовой части обмотки статора	$L_{\text{л}}$	94,3 мм
	– односторонняя толщина пазовой изоляции	$b_{\text{из.1}}$	0,2 мм
	– диаметр изолированного проводника обмотки статора	$d_{\text{из}}$	0,675 мм
	– двухсторонняя толщина изоляции проводника	$b_{\text{и.пр}}$	0,055 мм
Воздушный зазор			
3		δ	0,25 мм
Ротор:			
4	– наружный диаметр пакета	D_2	87,5 мм
	– число пазов	Z_2	28
	– скольжение ротора	S	0,0755
	– наружный диаметр подшипника	$D_{\text{п}}$	52 мм
Вентиляционные лопатки ротора:			
5	– число лопаток	$n_{\text{лоп}}$	12
	– наружный диаметр лопаток	$D_{\text{лоп}}$	85 мм
	– длина лопаток	$L_{\text{лоп}}$	35 мм
	– высота лопатки у основания	$h'_{\text{лоп}}$	17,4 мм
	– высота лопатки у вершины	$h''_{\text{лоп}}$	15 мм
Короткозамыкающие кольца обмотки ротора:			
6	– ширина кольца	$h_{\text{к}}$	17,4 мм
	– высота кольца	$L_{\text{к}}$	4,5 мм
	– сечение кольца	$q_{\text{к}}$	78,3 мм^2
Станина:			
7	– толщина станины	$h_{\text{ст}}$	4,5 мм
	– длина станины	$L_{\text{стан}}$	180 мм
	– число ребер	$N_{\text{р}}$	24
	– длина ребра	$L_{\text{р}}$	174 мм
	– высота ребра	$h_{\text{р}}$	20 мм
	– средняя толщина ребра	$b_{\text{р}}$	5 мм

Таблица 6.2

Потери мощности в номинальном режиме работы

№	Наименование параметра	Обозначение параметра	Численное значение, Вт
1	Потери в обмотке статора	P_{M1}	185,1
2	Основные потери в стали зубцов статора	P_{z1}	16,8
3	Потери в спинке статора	P_{c1}	19,7
4	Добавочные потери (поверхностные и пульсационные) в стали зубцов статора	P_{cd1}	3,0
5	Добавочные потери при нагрузке	P_{dob}	5,3
6	Потери в обмотке ротора	P_{z2}	65,2
7	Добавочные потери в стали зубцов ротора	P_{cd2}	2,5
8	Механические потери	P_{mexi}	3,5

A. Расчет источников тепла

1. Потери в меди пазовой части обмотки статора:

$$P_{M1\Pi} = \frac{P_{M1} \cdot L_1}{L_1 + L_n} = \frac{185,1 \cdot 78 \cdot 10^{-3}}{78 \cdot 10^{-3} + 94,3 \cdot 10^{-3}} = 83,8 \text{ Вт.}$$

2. Потери в меди лобовой части обмотки статора:

$$P_{M1\Pi} = P_{M1} - P_{M1\Pi} = 185,1 - 83,8 = 101,3 \text{ Вт.}$$

3. Суммарные потери в зубцах статора:

$$P_{Z1\Sigma} = P_{z1} + P_{cd1} + 0,5P_{dob} = 16,8 + 3 + 0,5 \cdot 5,3 = 22,45 \text{ Вт.}$$

4. Потери в спинке статора:

$$P_{c1} = 19,7 \text{ Вт.}$$

5. Потери в роторе:

$$P_p = P_{z2} + P_{cd2} + 0,5P_{dob} = 65,2 + 2,5 + 0,5 \cdot 5,3 = 70,35 \text{ Вт.}$$

6. Внутренние механические потери:

$$P_{mexi} = 3,5 \text{ Вт.}$$

Б. Расчет тепловых сопротивлений

1. Тепловое сопротивление обмотки статора между её пазовой и лобовой частями:

$$R_{\text{пл}} = \frac{L_1 + L_{\text{л}}}{12\lambda_{\text{м}} \cdot q_{\text{пр}} \cdot n_{\text{зл}} \cdot N_{\text{п}} \cdot Z_1} = \\ = \frac{78 \cdot 10^{-3} + 94,3 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 380 \cdot 0,302 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 82 \cdot 36} = 0,0424 \text{ град/Вт},$$

где $\lambda_{\text{м}} = 380 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ – коэффициент теплопроводности меди обмотки статора.

2. Тепловое сопротивление между пазовой частью обмотки статора и зубцами:

$$R_{\text{пз}} = R_{\text{эпз}} + R_{\text{пиз}} + R_{\delta\text{из}} + R_{\text{зп}} = \\ = 0,0368 + 0,0092 + 0,0712 + 0,002 = 0,1192 \text{ град/Вт},$$

где $R_{\text{эпз}}$ – эквивалентное тепловое сопротивление обмотки статора в направлении к зубцам:

$$R_{\text{эпз}} = \frac{(b_{\text{нср}} - 2 \cdot b_{\text{из1}}) \cdot (b_{\text{нпр}} + \Delta_{\delta})}{(d_{\text{из}} + \Delta_{\delta}) \cdot 2 \cdot h_{z1} \cdot L_1 \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{экв}}} = \\ = \frac{(5,0 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}) \cdot (0,055 \cdot 10^{-3} + 0,075 \cdot 10^{-3})}{(0,675 \cdot 10^{-3} + 0,075 \cdot 10^{-3}) \cdot 2 \cdot 13,4 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,275} = \\ = 0,0368 \text{ град/Вт},$$

где Δ_{δ} – воздушный зазор между проводниками в пазу статора:

$$\Delta_{\delta} = d_{\text{из}} \left[0,022 + 0,5 \cdot \left(1 / \sqrt{k_3} - 1 \right) \right] = \\ = 0,675 \cdot 10^{-3} \cdot \left[0,022 + 0,5 \cdot \left(1 / \sqrt{0,72} - 1 \right) \right] = 0,075 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$\lambda_{\text{экв}}$ – эквивалентный коэффициент теплопроводности всыпной обмотки:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{экв}} &= e^{-4k_3} (4,65 \cdot k_3^{1,5} - 0,7053) \cdot [1 + 0,81 \cdot 10^{-6} d_{\text{из}}^2 - 0,32 \cdot 10^3 d_{\text{из}} \times \\ &\quad \times (1 - 9,2k_{\text{пп}} + 5,2k_{\text{пп}}^2)] \cdot [1 + (0,0428k_{\text{пп}} - 0,0253) \cdot \Theta_{\text{об1}} \times \\ &\quad \times (\lambda_{\text{л}} / 0,162)^{0,33} \cdot (\lambda_{\text{из}} / 0,143)^{0,25}] = \\ &= e^{-40,72} (4,65 \cdot 0,72^{1,5} - 0,7053) \cdot [1 + 0,81 \cdot 10^{-6} (0,675 \cdot 10^{-3})^2 - \\ &\quad - 0,32 \cdot 10^3 \cdot 0,675 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 9,2 \cdot 0,27 + 5,2 \cdot 0,27^2)] \times \\ &\quad \times [1 + (0,0428 \cdot 0,72 - 0,0253) \cdot 100 \cdot (0,19 / 0,162)^{0,33} \times \\ &\quad \times (0,14 / 0,143)^{0,25}] = 0,275 \text{ Вт/м·град}; \end{aligned}$$

$k_{\text{пп}} = 0,25 \dots 0,3$ – коэффициент пропитки, выбираем $k_{\text{пп}} = 0,27$;
 $\Theta_{\text{об1}} = \Delta V_1 + V_{\text{окр}} = 61,6 + 40 = 101,6^\circ\text{C}$ – средняя температура обмотки (из п.109 теплового расчета $\Delta V_1 = 61,5^\circ\text{C}$; $V_{\text{окр}} = 40^\circ\text{C}$ – максимальная температура окружающего воздуха согласно ГОСТ IEC 60034-1-2014);

$\lambda_{\text{л}} = 0,19 \dots 0,2$ Вт/м·град; $\lambda_{\text{из}} = 0,14$ Вт/м·град – коэффициенты теплопроводности пропиточного лака МЛ-92 и изоляции провода;

$\lambda_{\text{пп}} = 0,21$ Вт/м·град; $\lambda_{\text{в}} = 0,036$ Вт/м·град; $\lambda_{\text{ст}} = 34$ Вт/м·град – коэффициенты теплопроводности пазовой изоляции, воздуха и материала сердечника статора.

$R_{\text{пиз}}$ – тепловое сопротивление пазовой изоляции в направлении к зубцам:

$$\begin{aligned} R_{\text{пиз}} &= b_{\text{из1}} / (2 \cdot h_{z1} \cdot L_1 \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{пп}}) = \\ &= 0,2 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 13,4 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,29) = 0,0092 \text{ град/Вт}. \end{aligned}$$

$R_{\delta_{\text{пз}}}$ – тепловое сопротивление воздушного зазора между пазовой изоляцией и зубцами:

$$R_{\delta_{\text{пз}}} = \delta_{\text{п,ст}} / (2 \cdot h_{z1} \cdot L_l \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{в}}) = \\ = 0,15 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 13,4 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,028) = \\ = 0,0712 \text{ град/Вт.}$$

$R_{\text{зп}}$ – тепловое сопротивление статора в направлении теплового потока от пазовой части обмотки:

$$R_{\text{зп}} = b_{z1} / (h_{z1} \cdot L_l \cdot k_{\text{с}} \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{ст}}) = \\ = 4 \cdot 10^{-3} / (13,4 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 36 \cdot 55,6) = 0,002 \text{ град/Вт,}$$

где $\lambda_{\text{ст}} = 55,6 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ – коэффициент теплопроводности материала сердечника статора (сталь 2013).

3. Тепловое сопротивление между пазовой частью обмотки статора и спинкой:

$$R_{\text{пс}} = R_{\text{эпс}} + R_{\text{пис}} + R_{\delta_{\text{пс}}} + R_{\text{с}} = 0,593 + 0,049 + 0,381 + 0,0039 = \\ = 1,027 \text{ град/Вт,}$$

где $R_{\text{эпс}}$ – тепловое сопротивление обмотки статора в направлении к спинке:

$$R_{\text{эпс}} = \frac{(h_{z1} - b_{\text{и31}}) \cdot (b_{\text{иpr}} + \Delta_{\delta})}{(d_{\text{и3}} + \Delta_{\delta}) \cdot b_{\text{иpr}} \cdot L_l \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{екв}}} = \\ = \frac{(13,4 \cdot 10^{-3} - 0,2 \cdot 10^{-3}) \cdot (0,055 \cdot 10^{-3} + 0,075 \cdot 10^{-3})}{(0,675 \cdot 10^{-3} + 0,075 \cdot 10^{-3}) \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,275} = \\ = 0,593 \text{ град/Вт.}$$

$R_{\text{пнс}}$ – тепловое сопротивление пазовой изоляции в направлении к спинке:

$$R_{\text{пнс}} = b_{\text{из1}} / (b_{\text{пср}} \cdot L_1 \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{из}}) = \\ = 0,2 \cdot 10^{-3} / (5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,29) = 0,049 \text{ град/Вт.}$$

$R_{\delta\text{пнс}}$ – тепловое сопротивление воздушного зазора между пазовой изоляцией и спинкой:

$$R_{\delta\text{пнс}} = \delta_{\text{пст}} / (b_{\text{пср}} \cdot L_1 \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{в}}) = \\ = 0,15 \cdot 10^{-3} / (5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,028) = 0,381 \text{ град/Вт.}$$

R_c – тепловое сопротивление нижней половины спинки статора в направлении теплового потока от пазовой части обмотки:

$$R_c = \frac{h_{\text{cl}}}{2 \cdot [\pi \cdot (D_1 - h_{\text{cl}}) - b_{z1} \cdot Z_1] \cdot L_1 \cdot k_c \cdot \lambda_{\text{ct}}} = \\ = \frac{11 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot [\pi \cdot (131 \cdot 10^{-3} - 8,1 \cdot 10^{-3}) - 4 \cdot 10^{-3} \cdot 36] \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 55,6} = \\ = 0,0039 \text{ град/Вт.}$$

4. Тепловое сопротивление между статором и ротором:

$$R_{\text{ст.р}} = R_z + R_\delta = 0,011 + 0,414 = 0,425 \text{ град/Вт,}$$

где R_z – тепловое сопротивление нижней половины зубцов статора:

$$R_z = h_{z1} / (2 \cdot b_{z1} \cdot L_1 \cdot k_c \cdot Z_1 \cdot \lambda_{\text{ct}}) = \\ = 13,4 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 36 \cdot 55,6) = \\ = 0,011 \text{ град/Вт.}$$

R_δ – тепловое сопротивление воздушного зазора между статором и ротором:

$$R_\delta = 1 / (\pi \cdot D \cdot L_1 \cdot \alpha_\delta) = 1 / (\pi \cdot 88 \cdot 78 \cdot 10^{-6} \cdot 112) = 0,414 \text{ град/Вт.}$$

Здесь α_δ – коэффициент теплоотдачи в расточке, зависящий от структуры потока воздуха в зазоре. Движение воздуха в зазоре может быть *ламинарным*, при котором отдельные слои воздуха движутся не перемешиваясь и частицы воздуха имеют определенные траектории или *турбулентным* с хаотично изменяющимися во времени траекториями, движения частиц. Переход ламинарного режима движения в турбулентный происходит при некотором значении безразмерного числа Рейнольдса, называемом критическим Re_{kp} .

Число Рейнольдса Re характеризует соотношение сил инерции и вязкости в потоке движущейся среды. При малых значениях Re силы инерции малы по сравнению с силами вязкости и движение имеет спокойный, струйчатый характер (ламинарное). Если инерции велики по сравнению с силами вязкости, то движение становится вихревым (турбулентным). При вращающемся роторе Re_{kp} определяется как:

$$Re_{kp} = 41,2 \cdot \sqrt{D_2 / (2 \cdot \delta)} = 41,2 \cdot \sqrt{87,5 / (2 \cdot 0,25)} = 545,1.$$

Для определения вида режима движения воздуха вычисляем число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\vartheta_p \cdot \delta}{v} = \frac{4,23 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 58,8;$$

$$\vartheta_p = \pi \cdot D_2 \cdot n_c \cdot (1 - s) =$$

$$= \pi \cdot 87,5 \cdot 10^{-3} \cdot 16,6 \cdot (1 - 0,0755) = 4,23 \text{ м/с},$$

$$v = 2,19 \cdot 10^{-5} \text{ – кинетическая вязкость воздуха в зазоре.}$$

Так как $Re < Re_{kp}$, то движение воздуха в зазоре ламинарное, и интенсивность теплообмена не зависит от частоты вращения. В этом случае:

$$\alpha_\delta = \frac{\lambda_{\text{вд}}}{\delta} = \frac{0,028}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 112 \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град.}$$

5. Тепловое сопротивление статора в направлении теплового потока:

$$R_{zc} = R_z + R_c = 0,011 + 0,0039 = 0,0149 \text{ град/Вт.}$$

6. Тепловое сопротивление между сердечником статора и станиной:

$$R_{c,стан} = R_{cb} + R_{δc,стан} + R_{стан} = 0,0025 + 0,0278 + 0,0008 = \\ = 0,0311 \text{ град/Вт.}$$

R_{cb} – тепловое сопротивление верхней половины спинки статора:

Так как

$$D_1 / (D_1 - 2 \cdot h_{cl}) = 131 \cdot 10^{-3} / (131 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 8,1 \cdot 10^{-3}) = 1,14 \leq 2,$$

то R_{cb} будет равно:

$$R_{cb} = \frac{h_{cl}}{2 \cdot \pi \cdot (D_1 - h_{cl}) \cdot L_1 \cdot k_c \cdot \lambda_{ct}} = \\ = \frac{8,1 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot \pi \cdot (131 \cdot 10^{-3} - 8,1 \cdot 10^{-3}) \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,97 \cdot 55,6} = \\ = 0,0025 \text{ град/Вт.}$$

$R_{\delta_{\text{с.стан}}}$ – тепловое сопротивление технологического зазора между сердечником статора и станиной:

$$R_{\delta_{\text{с.стан}}} = \delta_{\text{с.стан}} / (\pi \cdot D_1 \cdot l_1 \cdot \lambda_{\text{B}}) = \\ = 0,025 \cdot 10^{-3} / (\pi \cdot 131 \cdot 10^{-3} \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 0,028) = 0,025 \text{ град/Вт.}$$

$R_{\text{стан}}$ – тепловое сопротивление станины в радиальном направлении:

$$R_{\text{стан}} = \frac{h_{\text{стан}}}{\pi(D_1 + h_{\text{стан}}) \cdot L_1 \cdot \lambda_{\text{стан}}} = \\ = \frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{\pi(131 \cdot 10^{-3} + 4,5 \cdot 10^{-3}) \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 170} = 0,0008 \text{ град/Вт,}$$

где $\lambda_{\text{стан}} = 170 \text{ Вт/м}^2\text{.град}$ – коэффициент теплопроводности материала станины (алюминиевый сплав АК 10с ТУ16-501-022-77).

7. Тепловое сопротивление лобовой части обмотки статора:

$$R_{\text{лст}} = R_{\text{эл}} + R_{\text{ил}} + R_{\text{ал}} = 0,028 + 0,02 + 0,242 = 0,29 \text{ град/Вт,}$$

где $R_{\text{эл}}$ – эквивалентное тепловое сопротивление лобовой части:

$$R_{\text{эл}} = \frac{L_1}{L_1 \cdot (1/R_{\text{энz}} + 1/R_{\text{энc}})} = \\ = \frac{78 \cdot 10^{-3}}{94,3 \cdot 10^{-3} (1/0,0368 + 1/0,593)} = 0,028 \text{ град/Вт.}$$

$R_{\text{ил}}$ – тепловое сопротивление изоляции лобовой части:

$$R_{\text{ил}} = \frac{b_{\text{изл}}}{2 \cdot (b_{\text{нср}} + h_{z1}) \cdot L_{\text{л}} \cdot Z_1 \cdot k_{\text{л}} \cdot \lambda_{\text{ил}}} =$$

$$= \frac{0,23 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot (5,0 \cdot 10^{-3} + 13,4 \cdot 10^{-3}) \cdot 94,3 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,5 \cdot 0,14} =$$

$$= 0,02 \text{ град/Вт.}$$

где $k_{\text{л}}$ – коэффициент обдува лобовых частей (для всыпных обмоток $k_{\text{л}} = 0,4 \dots 0,6$).

$R_{\omega\text{л}}$ – тепловое сопротивление от поверхности лобовой части к внутреннему воздуху:

$$R_{\omega\text{л}} = \frac{1}{2 \cdot (h_{z1} + b_{\text{нср}}) \cdot L_{\text{л}} \cdot Z_1 \cdot k_{\text{л}} \cdot \alpha_{\text{л}}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot (13,4 \cdot 10^{-3} + 5,0 \cdot 10^{-3}) \cdot 78 \cdot 10^{-3} \cdot 36 \cdot 0,5 \cdot 55,1} =$$

$$= 0,242 \text{ град/Вт.}$$

Здесь $\alpha_{\text{л}}$ – средний коэффициент теплоотдачи с поверхности лобовых частей.

При наличии вентиляционных лопаток коэффициент $\alpha_{\text{л}}$ зависит от величины Re . Так как внешняя и внутренняя поверхности лобовых частей омываются воздухом с различной интенсивностью, число Re для них разные:

– для поверхности, обращенной к станине

$$Re_{\text{стан}} = \frac{\vartheta_{\text{л}} \cdot d_{\text{экв}}}{\nu} = \frac{1,72 \cdot 0,0073}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 697,6;$$

– для поверхности, обращенной к ротору

$$Re_{\text{пот}} = \frac{\vartheta_{\text{л}} \cdot L_{\text{лон}}}{\nu} = \frac{1,72 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 955,6,$$

где

$$\begin{aligned}\vartheta_{\text{л}} &= 1,32 \cdot D_{\text{лон}} \cdot n_{\text{с}} \cdot (1-s) = \\ &= 1,32 \cdot 85 \cdot 10^{-3} \cdot 16,6 \cdot (1 - 0,0755) = 1,72 \text{ м/с}\end{aligned}$$

– средняя скорость воздуха на выходе из вентиляционных лопаток;
 ν – кинематическая вязкость внутреннего воздуха; $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр стержня обмотки на выходе из паза:

$$\begin{aligned}d_{\text{экв}} &= 4 \cdot b_{\text{пср}} \cdot h_{Z1} / [2(b_{\text{пср}} + h_{Z1})] = \\ &= 4 \cdot 5,0 \cdot 10^{-3} \cdot 13,4 \cdot 10^{-3} / [2(5,0 \cdot 10^{-3} + 13,4 \cdot 10^{-3})] = 0,0073 \text{ м.}\end{aligned}$$

Для продуваемых лобовых частей числа Нуссельта для указанных областей:

$$Nu_{\text{стан}} = 0,103 \cdot Re_{\text{стан}}^{0,67} = 0,103 \cdot 697,6^{0,67} = 8,3;$$

$$Nu_{\text{пот}} = 0,456 \cdot Re_{\text{пот}}^{0,6} = 0,456 \cdot 955,6^{0,6} = 27,99.$$

Тогда коэффициент теплоотдачи:

$$\begin{aligned}\alpha_{\text{л}} &= 0,5 \left(\frac{Nu_{\text{стан}} \cdot \lambda_{\text{в}}}{d_{\text{экв}}} + \frac{Nu_{\text{пот}} \cdot \lambda_{\text{в}}}{L_{\text{лон}}} \right) = \\ &= 0,5 \left(\frac{8,3 \cdot 0,028}{0,0073} + \frac{27,99 \cdot 0,028}{0,01} \right) = 55,1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град.}\end{aligned}$$

8. Тепловое сопротивление отводу тепла от пазовой зоны ротора:

$$R_{\text{пот.в}} = R_{\text{пот}} + R_{\alpha,\text{пот}} = 0,03 + 0,596 = 0,626 \text{ град/Вт},$$

где $R_{\text{пот}}$ – тепловое сопротивление между пазовой и лобовой частями обмотки ротора:

$$R_{\text{пот}} = \frac{L_2 + L_k}{12 \cdot q_c \cdot Z_2 \cdot \lambda_{M2}} = \frac{78 \cdot 10^{-3} + 4,5 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 43,2 \cdot 10^{-6} \cdot 28 \cdot 190} = 0,03 \text{ град/Вт},$$

где $\lambda_{M2} = 190 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ – коэффициент теплопроводности материала обмотки ротора (алюминиевый сплав А5Е ГОСТ 11069-2019);

$R_{\alpha,\text{пот}}$ – тепловое сопротивление от поверхности лобовых частей обмотки ротора к внутреннему воздуху:

$$\begin{aligned} R_{\alpha,\text{пот}} &= \frac{1}{2[2L_{\text{лон}} \cdot n_{\text{лон}} \cdot (h'_{\text{лон}} + h''_{\text{лон}}) + \pi(D_2 - h_k)(h_k + L_k)]} \cdot \frac{1}{\alpha_{\text{пот}}} = \\ &= \frac{1}{2[2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot 9 \cdot (17,4 + 16,4) \cdot 10^{-3} + \pi(87,5 - 17,4) \cdot 10^{-3} (17,4 + 4,5) \cdot 10^{-3}]} \times \\ &\quad \times \frac{1}{75,68} = 0,596 \text{ град/Вт}, \end{aligned}$$

где $\alpha_{\text{пот}}$ – коэффициент теплоотдачи с поверхности лобовых частей обмотки ротора:

$$\alpha_{\text{пот}} = \frac{\lambda_{bi} \cdot \text{Nu}_{\text{лон}}}{0,5 \cdot (h'_{\text{лон}} + h''_{\text{лон}})} = \frac{0,028 \cdot 47,03}{0,5(17,4 \cdot 10^{-3} + 16,4 \cdot 10^{-3})} = 75,68 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град};$$

$$\text{Nu}_{\text{лон}} = 0,747 \cdot \text{Re}_3^{0,5} = 0,747 \cdot 3963,3^{0,5} = 47,03;$$

$$\begin{aligned} \text{Re}_3 &= \frac{\pi \cdot D_{\text{лон}} \cdot n_c \cdot (1-s) \cdot 0,5(h'_{\text{лон}} + h''_{\text{лон}})}{\nu} = \\ &= \frac{\pi \cdot 85 \cdot 10^{-3} \cdot 16,6 \cdot (1 - 0,0755) \cdot 0,5 \cdot (17,4 \cdot 10^{-3} + 16,4 \cdot 10^{-3})}{1,8 \cdot 10^{-5}} = 3963,3 \end{aligned}$$

9. Тепловое сопротивление отводу тепла от внутреннего воздуха к станине:

$$R_{\text{стан.}i} = \frac{1}{\pi \cdot D_1 \cdot (L_{\text{стан}} - L_1) \cdot \alpha_{\text{стан.}i}} = \\ = \frac{1}{\pi \cdot 131 \cdot 10^{-3} \cdot (150 \cdot 10^{-3} - 78 \cdot 10^{-3}) \cdot 27,24} = 1,23 \text{ град/Вт},$$

где $L_{\text{стан}} = L_1 + 2L_{\text{выл}} = 78 + 2 \cdot 36 = 150$ мм – длина станины; $\alpha_{\text{стан.}i}$ – средний коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности станины.

При наличии вентиляционных лопаток на роторе $\alpha_{\text{стан.}i}$ равен:

$$\alpha_{\text{стан.}i} = \text{Nu}_{\text{стан.}i} \cdot \lambda_{\text{вп}} / D_1 = 127,46 \cdot 0,028 / 0,131 = 27,24 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град},$$

где число Нуссельта для двигателей с $h = 56 \dots 132$ мм равно:

$$\text{Nu}_{\text{стан.}i} = 43,78 \cdot \text{Re}_{\text{стан}}^{0,17} \cdot [(D_1 - D_{\text{лоб.в}}) / D]^{0,25} = \\ = 43,78 \cdot 15356^{0,17} \cdot [(131 \cdot 10^{-3} - 122 \cdot 10^{-3}) / 88 \cdot 10^{-3}]^{0,25} = 127,46.$$

Здесь число Рейнольдса определяется по формуле:

$$\text{Re}_{\text{стан.}i} = \frac{\vartheta_p \cdot D_1}{2 \cdot \nu} = \frac{4,23 \cdot 131 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 15356;$$

$$\vartheta_p = \pi \cdot D_2 \cdot n_c \cdot (1 - s) = \\ = \pi \cdot 87,5 \cdot 10^{-3} \cdot 16,6 \cdot (1 - 0,0755) = 4,23 \text{ м/с.}$$

10. Тепловое сопротивление отводу тепла от внутреннего воздуха к подшипниковым щитам:

$$R_{\text{ш}i} = \frac{1}{\alpha_{\text{ш}i} \cdot \pi \cdot (D_{\text{стан}}^2 - D_{\text{n}}^2) / 2} = \\ = \frac{1}{35,69 \cdot \pi \cdot ((140 \cdot 10^{-3})^2 - (52 \cdot 10^{-3})^2) / 2} = 1,056 \text{ град/Вт},$$

где $D_{\text{n}} = 52$ мм – наружный диаметр подшипника; $\alpha_{\text{ш}i}$ – средний коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности подшипниковых щитов:

$$\alpha_{\text{ш}i} = \frac{\text{Nu}_{\text{ш}} \cdot \lambda_{\text{в}i}}{(D_1 + D) / 2} = \\ = \frac{139,59 \cdot 0,028}{(131 \cdot 10^{-3} + 88 \cdot 10^{-3}) / 2} = 35,69 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град},$$

где число Нуссельта $\text{Nu}_{\text{ш}}$ зависит от конструкции и габаритов двигателя, а также от числа Рейнольдса $\text{Re}_{\text{ш}}$:

$$\text{Re}_{\text{ш}} = \frac{\vartheta_{\text{p}} \cdot (D_1 + D)}{4 \cdot \nu} = \\ = \frac{4,23 \cdot (131 \cdot 10^{-3} + 88 \cdot 10^{-3})}{4 \cdot 1,8 \cdot 10^{-5}} = 12835,8.$$

При $h = 56 \dots 132$ мм число Нуссельта $\text{Nu}_{\text{ш}}$ равно

$$\text{Nu}_{\text{ш}} = 8,34 \cdot \text{Re}_{\text{ш}}^{0,25} \cdot [(D_1 - D) / D]^{-0,5} = \\ = 8,34 \cdot 12835,8^{0,25} \cdot [(131 \cdot 10^{-3} - 88 \cdot 10^{-3}) / 88 \cdot 10^{-3}]^{-0,5} = 139,59.$$

11. Тепловое сопротивление от наружной поверхности подшипниковых щитов к окружающей среде:

$$R_{\text{що}} = \frac{1}{0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{стан}}^2 \cdot \alpha_{\text{що}}} = \frac{1}{0,5 \cdot \pi \cdot 0,14^2 \cdot 43,855} = 0,741 \text{ град/Вт},$$

где $\alpha_{\text{що}}$ – средний коэффициент теплоотдачи с наружной поверхности подшипниковых щитов:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{що}} &= 0,5 \cdot (\alpha_{\text{щв}} + \alpha_{\text{щраб}}) = \\ &= 0,5 \cdot (61,15 + 26,56) = 43,855 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}. \end{aligned}$$

Здесь $\alpha_{\text{щв}}$ и $\alpha_{\text{щраб}}$ – коэффициенты теплоотдачи подшипниковых щитов соответственно со стороны вентилятора и со стороны рабочего выходного кона вала:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{щв}} &= 20 + 8,2 \cdot U_2^{0,8} = 20 + 8,2 \cdot 7,51^{0,8} = 61,15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}; \\ \alpha_{\text{щраб}} &= 20 + 1,6 \cdot U_2^{0,7} = 20 + 1,6 \cdot 7,51^{0,7} = 26,56 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}, \end{aligned}$$

где U_2 – окружная скорость лопатки (см. §4.9, п.98).

12. Тепловое сопротивление обдуваемой оребренной станины к охлаждающему воздуху:

$$\begin{aligned} R_{\text{стально}} &= \frac{1}{\alpha_{\text{от}} \cdot S_{\text{от}} + \alpha_{\text{зак}} \cdot S_{\text{зак}}} = \\ &= \frac{1}{31,053 \cdot 0,15 + 78,13 \cdot 0,05} = 0,1167 \text{ град/Вт}, \end{aligned}$$

где $\alpha_{\text{от}}$ – коэффициент теплоотдачи открытых (боковых и верхних) межреберных каналов станины:

$$\begin{aligned} \alpha_{\text{от}} &= \alpha_{\text{bx}} \frac{\left(1 - e^{-\gamma \cdot L_p / d_r}\right) \cdot d_r}{\gamma \cdot L_p} = \\ &= 149,3 \frac{\left(1 - e^{-0,19 \cdot 0,14 / 0,00558}\right) \cdot 0,00558}{0,19 \cdot 0,14} = 31,053 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}; \end{aligned}$$

$\alpha_{зак}$ – коэффициент теплоотдачи закрытых (между лапами) межреберных каналов станины:

$$\alpha_{закр} = \alpha_{вх} \left(1 - \frac{0,019 \cdot L_p}{d_r} \right) = \\ = 149,3 \left(1 - \frac{0,019 \cdot 0,14}{0,00558} \right) = 78,13 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град},$$

где $d_r = \frac{4b_p \cdot h_p}{2h_p + b_p} = \frac{4 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-3} + 3 \cdot 10^{-3}} = 0,00558 \text{ м}$ – гидравлический диаметр межреберного канала;

$$\gamma = 0,55 \left[1 - \text{th} \left(0,062 \left(D_{стан} / d_r - 12,5 \right) \right) \right] = \\ = 0,55 \left[1 - \text{th} \left(0,062 \left(140 \cdot 10^{-3} / 0,00558 - 12,5 \right) \right) \right] = 0,19;$$

$\alpha_{вх}$ – коэффициент теплоотдачи на входе в каналы:

$$\alpha_{вх} = \lambda_{вн} \cdot \text{Nu}_{вх} / d_r = 0,0271 \cdot 30,745 / 0,00558 = 149,3$$

где $\lambda_{вн} = 0,0271 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ – коэффициент теплопроводности наружного воздуха;

$$\text{Nu}_{вх} = 0,627 \cdot \text{Re}_{вх}^{0,52} = 0,627 \cdot 1782,3^{0,52} = 30,745;$$

$$\text{Re}_{вх} = \vartheta_{вх} \cdot d_r / \nu_{вн} = 5,43 \cdot 0,00558 / 1,7 \cdot 10^{-5} = 1782,3;$$

$$\vartheta_{вх} = \sqrt{\vartheta_{вх}^2 + (0,5 \cdot \vartheta_2)^2} = \sqrt{3,92^2 + (0,5 \cdot 7,51)^2} = 5,43 \text{ м/с}$$

– эффективная скорость воздуха;

$\vartheta_{вх} = Q' / S_{вх} = 0,251 / 6400 \cdot 10^{-6} = 3,92 \text{ м/с}$ – скорость на входе в каналы.

Площади поверхностей станины с открытыми и закрытыми межреберными каналами:

$$S_{\text{от}} = \frac{3}{4} S_{\text{стан}} = \frac{3}{4} 0,2 = 0,15 \text{ м}^2;$$

$$S_{\text{зак}} = \frac{1}{4} S_{\text{стан}} = \frac{1}{4} 0,2 = 0,05 \text{ м}^2,$$

где $S_{\text{стан}}$ – наружная поверхность станины:

$$\begin{aligned} S_{\text{стан}} &= \pi D_{\text{стан}} \cdot L_{\text{стан}} + 2 h_p \cdot L_p \cdot N_p = \\ &= \pi \cdot 0,14 \cdot 0,15 + 2 \cdot 0,02 \cdot 0,14 \cdot 24 = 0,2 \text{ м}^2. \end{aligned}$$

В. Составление и решение системы уравнений теплового баланса

Система уравнений в общем виде будет иметь вид:

$$P_{z1\Sigma} = \theta_1 \cdot (R_{zc}^{-1} + R_{nz}^{-1} + R_{\text{ср.п}}^{-1}) - \theta_2 \cdot R_{zc}^{-1} - \theta_3 \cdot R_{nz}^{-1} - \theta_7 \cdot R_{\text{ср.п}}^{-1};$$

$$P_{c1} = \theta_2 \cdot (R_{zc}^{-1} + R_{nc}^{-1} + R_{\text{с.стан}}^{-1}) - \theta_1 \cdot R_{zc}^{-1} - \theta_3 \cdot R_{nc}^{-1} - \theta_4 \cdot R_{\text{с.стан}}^{-1};$$

$$P_{m1\Pi} = \theta_3 \cdot (R_{nz}^{-1} + R_{nc}^{-1} + R_{\text{пл}}^{-1}) - \theta_1 \cdot R_{nz}^{-1} - \theta_2 \cdot R_{nc}^{-1} - \theta_5 \cdot R_{\text{пл}}^{-1};$$

$$P_{\text{мех.}i} = \theta_4 \cdot (R_{\text{с.стан}}^{-1} + R_{\text{шо}}^{-1} + R_{\text{стан.о}}^{-1} + R_{\text{стан}}^{-1} + R_{\text{шт}}^{-1}) -$$

$$- \theta_2 \cdot R_{\text{с.стан}}^{-1} - \theta_6 \cdot (R_{\text{стан.}i}^{-1} + R_{\text{шт}}^{-1});$$

$$P_{m1\Pi} = \theta_5 \cdot (R_{\text{пл}}^{-1} + R_{\text{л.ср}}^{-1}) - \theta_3 \cdot R_{\text{пл}}^{-1} - \theta_6 \cdot R_{\text{л.ср}}^{-1};$$

$$P_{bi} = \theta_6 \cdot (R_{\text{л.ср}}^{-1} + R_{\text{стан.}i}^{-1} + R_{\text{шт.}i}^{-1} + R_{\text{пот.в}}^{-1}) -$$

$$- \theta_5 \cdot R_{\text{л.ср}}^{-1} - \theta_4 \cdot (R_{\text{стан.}i}^{-1} + R_{\text{шт.}i}^{-1}) - \theta_7 \cdot R_{\text{пот.в}}^{-1};$$

$$P_p = \theta_7 \cdot (R_{\text{ср.п}}^{-1} + R_{\text{пот.в}}^{-1}) - \alpha \theta_1 \cdot R_{\text{ср.п}}^{-1} - \theta_6 \cdot R_{\text{пот.в}}^{-1}.$$

При записи этих уравнений принято, что $\theta_{\text{бо}} = 0$, и для перегревов узлов введены следующие обозначения: $\Delta\theta_{z1} = \theta_1$, $\Delta\theta_{c1} = \theta_2$, $\Delta\theta_{n1} = \theta_3$, $\Delta\theta_{\text{стан}} = \theta_4$, $\Delta\theta_{l1} = \theta_5$, $\Delta\theta_i = \theta_6$, $\Delta\theta_p = \theta_7$.

Подставляя в эти уравнения вычисленные значения мощности источников тепла и тепловых сопротивлений, получим систему уравнений, описывающих тепловой баланс двигателя в установившемся режиме работы при номинальной нагрузке:

$$66,13 = \theta_1(0,0142^{-1} + 0,1437^{-1} + 0,23^{-1}) -$$

$$-\theta_2 \cdot 0,0142^{-1} - \theta_3 \cdot 0,1437^{-1} - \theta_7 \cdot 0,23^{-1};$$

$$31,13 = \theta_2(0,0142^{-1} + 0,5229^{-1} + 0,0191^{-1}) -$$

$$-\theta_1 \cdot 0,0142^{-1} - \theta_3 \cdot 0,5229^{-1} - \theta_4 \cdot 0,0191^{-1};$$

$$222,7 = \theta_3(0,1437^{-1} + 0,5229^{-1} + 0,03^{-1}) -$$

$$-\theta_1 \cdot 0,1437^{-1} - \theta_2 \cdot 0,5229^{-1} - \theta_5 \cdot 0,03^{-4};$$

$$5,07 = \theta_4(0,0191^{-1} + 0,43^{-1} + 0,000625^{-1} + 0,7^{-1} + 1,155^{-1}) -$$

$$-\theta_2 \cdot 0,0191^{-1} - \theta_6(0,7^{-1} + 1,155^{-1});$$

$$104,3 = \theta_5(0,03^{-1} + 0,78857^{-1}) - \theta_3 \cdot 0,03^{-1} - \theta_6 \cdot 0,78857^{-1};$$

$$0 = \theta_6(0,78857^{-1} + 0,7^{-1} + 1,155^{-1} + 0,016468^{-1}) -$$

$$-\theta_5 \cdot 0,78857^{-1} - \theta_4(0,7^{-1} + 1,155^{-1}) - \theta_7 \cdot 0,016468^{-1};$$

$$75,9 = \theta_7(0,23 + 0,016468^{-1}) - \theta_1 \cdot 0,23^{-1} - \theta_6 \cdot 0,016468^{-1}.$$

Для удобства и наглядности запишем коэффициенты полученной системы в форме табл. 6.3.

Таблица 6.3

Коэффициенты системы уравнений теплового баланса двигателя

Номер уравнения	Свободный член	Коэффициент при					
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
1	66,13	81,7293	-70,4225	-6,95894	0	0	0
2	31,13	-70,4225	124,691	-1,91241	-52,356	0	0
3	222,7	-6,95894	-1,91241	42,20469	0	-33,3333	0
4	5,07	0	-52,356	0	69,35451	0	-0,56277
5	104,3	0	0	-33,3333	0	34,60145	-1,26812
6	0	0	0	0	-0,56277	-1,26812	64,28632
7	75,9	-4,34783	0	0	0	0	-60,7238
							65,07165

Решая систему уравнений при помощи метода Гаусса, получаем:

- перегрев зубцов статора $\theta_1 = 38,5^\circ\text{C}$;
- перегрев спинки статора $\theta_2 = 34,04^\circ\text{C}$;
- перегрев пазовой части обмотки статора $\theta_3 = 70,31^\circ\text{C}$;
- перегрев корпуса $\theta_4 = 26,13^\circ\text{C}$;
- перегрев лобовой части обмотки статора $\theta_5 = 72,35^\circ\text{C}$;
- перегрев внутреннего воздуха $\theta_6 = 43,77^\circ\text{C}$;
- перегрев ротора $\theta_7 = 44,58^\circ\text{C}$;

Полученные результаты показывают, что температуры всех основных узлов спроектированного двигателя находятся в допустимых пределах (допустимые температуры отдельных частей электрической машины приведены в параграфе 6.3).

Следует отметить, что поскольку работоспособность электрической машины в значительной степени зависит от степени нагрева ее основных узлов, то актуальность оценки их теплового состояния еще на этапе проектирования не вызывает сомнения.

Вопросы и задания для самопроверки

1. На какие виды делят потери в электрических машинах по их физической природе?
2. Дайте характеристику трем основным видам теплообмена.
3. Приведите основные параметры, характеризующие теплообмен в АД.
4. От чего зависят тепловые сопротивления тепло-проводности и теплоотдачи?
5. Каков физический механизм переноса тепла внутри элементов электрической машины, представляющих собой твердые тела?
6. От чего зависит эффективность конвективного переноса тепла?
7. Опишите основные методы теплового расчета ЭМ.

8. Что такое тепловая схема замещения и каковы принципы ее построения и расчета?
9. Приведите аналогию тепловой схемы замещения с электрической.
10. Как рассчитывают тепловые сопротивления?
11. Какую цель преследует оребрение корпуса электрических машин закрытого исполнения?
12. Чем отличаются тепловые схемы замещения при различных вариантах конструкции и систем охлаждения ЭМ?
13. Приведите варианты тепловых схем замещения АД и поясните их.
14. Поясните характер процессов нагрева и охлаждения ЭМ.
15. Перечислите принципы построения и расчета эквивалентной аэродинамической схемы замещения вентиляционной цепи электродвигателя.

Глава 7

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ ТОРМОЗНОЙ МОДИФИКАЦИИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ВСТРОЕННЫМ ПРУЖИННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ТОРМОЗОМ

7.1. Назначение, устройство и принцип действия электромеханического тормозного устройства

В электроприводах автоматизированных систем часто используются асинхронные электродвигатели со встроенным электромеханическим фрикционным тормозным устройством. Такие машины применяются в станкостроении, робототехнике, авиации и во многих других областях техники [12]. Так, широкое внедрение и использование высокопроизводительного металлообрабатывающего оборудования, в том числе с программным управлением, вызывает необходимость применения устройств быстрой остановки и фиксации подвижных органов в точке позиционирования. Прямая зависимость качества деталей, изготовленных на станках с ЧПУ, от точности перемещений и позиционирования рабочих органов станка в строгом соответствии с управляющей программой требует использования тормозных устройств с высоким быстродействием и стабильностью тормозного момента. При этом задача повышения надежности оборудования и безопасности работы обслуживающего персонала выдвигает требование обязательного останова и удержания кинематических узлов в случае аварийного отключения напряжения питающей сети, что может быть обеспечено только механическим торможением. Поскольку в современном технологическом оборудовании все большее число сложных взаимных движений деталей и инструмента осуществляется с помощью электропривода, то для создания позиционного привода с высокими технико-экономическими показателями наиболее перспективным является применение нормально замкнутых электромеханических тормозных устройств (ЭМТУ), встроенных непосредственно в электродвигатель [13]. От параметров и характеристик ЭМТУ в

значительной степени зависят обеспечение технологических режимов обработки деталей с допустимыми геометрическими погрешностями, производительность обработки, а также надежность и безопасность эксплуатации станка. Применение ЭМТУ обеспечивает:

- 1) удерживание и фиксацию вала электродвигателя, на который действует момент со стороны приводного механизма;
- 2) сокращение времени инерционных выбегов вращающегося вала;
- 3) точное позиционирование рабочих органов приводного механизма;
- 4) аварийную остановку при исчезновении напряжения питания.

Выполняя перечисленные функции, электромеханическое тормозное устройство обеспечивает значительное повышение производительности и качества работы технологического оборудования, а также принципиально увеличивает безопасность их работы.

Наряду с автоматизированным оборудованием, АД со встроенным ЭМТУ применяются также и в электроприводах других механизированных машинных агрегатов, например, в электроприводах подъемно-транспортных машин и механизмов [14].

Электромеханическое тормозное устройство содержит две основные части:

- электромеханический фрикционный тормоз;
- электромагнитный привод для размыкания тормоза.

Каждая из этих частей выполняет принципиально разное функциональное назначение. Фрикционный тормоз служит для создания на приводном валу тормозного момента и выполнен в виде нормально замкнутого фрикционного тормозного узла. Электромагнитный привод предназначен для изменения режима работы тормоза и выполнен в виде растормаживающего электромагнита. Схема управления обеспечивает при включении электродвигателя подачу на обмотку этого электромагнита напряжения, за счет чего он срабатывает и обеспечивает тем самым размыкание фрикционного тормозного узла. Таким образом, вал электродвигателя растормаживается. При отключении электродвигателя напряжение снимается с обмотки электромагнита, тормоз замыкается и вал электродвигателя затормаживается.

На рисунке 7.1, а,б показано принципиальное устройство ЭМТУ, а на рис. 7.1, в приведена простейшая схема его управления.

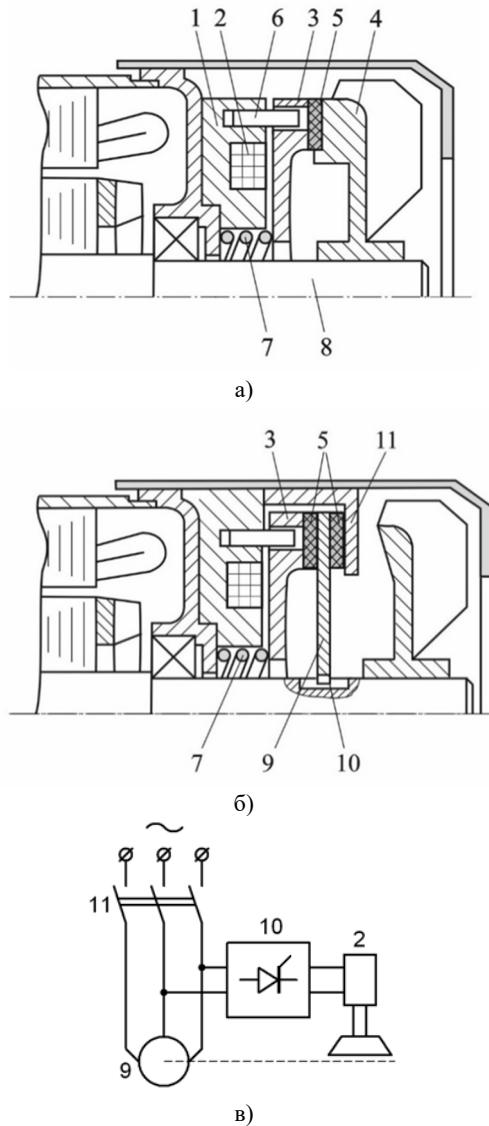


Рис. 7.1. Конструкция (а, б) и принципиальная схема управления (в) электромеханического тормозного устройства

ЭМТУ, показанный на рис. 7.1, *a*, состоит из растормаживающего электромагнита, содержащего магнитопровод 1 с обмоткой 2, и фрикционного тормоза, содержащего якорь 3 и тормозной диск-вентилятор 4 с фрикционной накладкой 5. Якорь 3 может перемещаться в аксиальном направлении по штифтам 6, закрепленным в магнитопроводе 1. Якорь 3 прижат усилием тормозной пружины 7 к тормозному диску-вентилятору 4, который установлен неподвижно на валу 8 электродвигателя. Таким образом, в данной конструкции фрикционный узел имеет одну фрикционную пару.

ЭМТУ, показанный на рис. 7.1,*б*, отличается от предыдущей конструкции тем, что имеет две пары фрикционных поверхностей. Для этого на тормозном диске 9, установленном на валу посредством шлицевого соединения 10, с двух сторон наклеены фрикционные накладки 5. Тормозной диск 9 зажат усилием тормозной пружины 7 между якорем 3 и тормозным фланцем 11.

Обмотка растормаживающего электромагнита ЭМТУ подключена к зажимам АД через выпрямитель 12.

При отключенном питании тормоз замкнут, и вал 8 под действием сил трения в фрикционном узле находится в заторможенном состоянии. При включении электродвигателя в сеть посредством контактов 11 коммутационного аппарата напряжение одновременно подается на обмотку 2. Она создает магнитный поток, который замыкается по магнитопроводу 1, якорю 3 и воздушному зазору между ними. Якорь 3, преодолевая усилие пружины 7, притягивается к магнитопроводу 1. За счет этого тормозной диск 4 освобождается и вал 8 растормаживается. При отключении электродвигателя обмотка 2 также отключается от источника питания. Тяговое усилие растормаживающего электромагнита исчезает, и усилием пружины 7 якорь прижимается к тормозному диску 4, за счет чего вал вновь тормозится.

Тормозной момент дискового тормоза равен [12]:

$$M_t = Z k_{tp} F_{np} R_{cp} k_z, \quad (7.1)$$

где Z – число пар поверхностей трения (например, на рис.7.1, *a* имеем $Z=1$, а на рис.7.1.*б* $Z=2$); k_{tp} – коэффициент трения;

$F_{\text{пр}}$ – осевое усилие пружин; $R_{\text{ср}}$ – средний радиус действия силы трения; k_z – коэффициент уменьшения осевого усилия $F_{\text{пр}}$ вследствие потерь на трение в направляющих штифтах.

Как следует из уравнения (7.1), увеличение тормозного момента M_t можно обеспечить увеличением числа Z . Поэтому фрикционный узел ЭМТ нередко выполняется с двумя парами поверхностей трения (рис. 7.1, б), расположенными с обеих сторон тормозного диска 9, а также многодисковым (рис. 7.2, а).

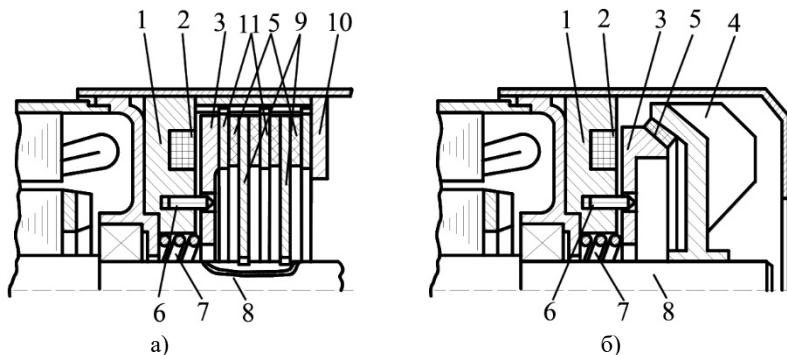


Рис. 7.2. Принципиальные конструкции многодисковых (а) и конусных (б) фрикционных узлов ЭМТУ

В первом случае тормозной диск 9, установленный на валу с возможностью осевого перемещения, зажимается тормозной пружиной между якорем 3 и неподвижной тормозной поверхностью 10 (см. рис. 7.1, б). Во втором случае фрикционный узел содержит пакет чередующихся вращающихся 1 и не вращающихся 3 тормозных дисков, установленных, соответственно, на валу 2 и тормозном фланце 4 также с возможностью осевого перемещения (рис. 7.2, а). Диски 1 могут иметь фрикционные накладки.

Для повышения тормозного момента фрикционная поверхность может быть выполнена конусной (рис. 7.2, б). Тормозной момент конусного тормоза [12] рассчитывается по формуле:

$$M_t = \frac{k_{\text{тр}} F_{\text{пр}} R_{\text{ср}} k_z}{\sin \frac{\beta}{2}}, \quad (7.2)$$

где β – угол конуса.

При одном и том же усилии $F_{\text{пр}}$ и одинаковом среднем радиусе R действия сил трения тормозной момент M_t конусного тормоза в 2,5...3 раза больше, чем у дискового с одной поверхностью трения. Величина угла конуса β должна быть на 2...3 градуса больше угла трения для исключения заедания конусов.

7.2. Выбор базовой конструктивной модификации электромеханического тормозного устройства при проектировании тормозной модификации асинхронного двигателя

Электромеханические тормозные устройства (ЭМТУ), встраиваемые в электродвигатели, представляют собой систему, которая, как это следует из параграфа 7.1, содержит три различающихся по функциональному назначению узла.

1. Непосредственно фрикционный тормоз, т.е. рабочий механизм, создающий тормозной момент на валу для его принудительного торможения и фиксации в заторможенном состоянии.

2. Привод в виде растормаживающего электромагнита, который служит для размыкания тормоза, т.е. для растормаживания вала.

3. Схему управления приводом, которая формирует оптимальный закон изменения напряжения, прикладываемого к обмотке растормаживающего электромагнита, обеспечивая тем самым требуемые параметры быстродействия тормоза при его размыкании и замыкании. Конструктивно тормозные модификации электродвигателей можно разделить на три группы.

Первая группа характеризуется тем, что растормаживающий электромагнит ЭМТУ встроен в подшипниковый щит электродвигателя (или пристроен к нему) и имеет общее с обмоткой статора питание. Это электродвигатели специального исполнения, имеющие специальный подшипниковый щит, вал и вводное устройство.

Во вторую группу тормозных модификаций входят обычные электродвигатели, которые снабжены тормозным устройством, имеющим независимое от обмотки статора питание. Пристраивание ЭМТУ обеспечивается за счет незначительной доработки серийного базового подшипникового щита и участка вала со стороны вентилятора.

В третью группу входят базовые серийные электродвигатели и автономные ЭМТУ, устанавливаемые на общей фундаментальной плате.

Каждая из перечисленных групп, в свою очередь, делится на подгруппы в зависимости от конкретных конструктивных признаков.

Важнейшей составной частью ЭМТУ, в значительной степени определяющей его технико-экономические показатели, является фрикционный тормоз. Для электродвигателей в основном применяются тормоза с осевым нажатием, которые по сравнению с другими известными конструкциями (колодочными и ленточными) являются более предпочтительными [12,13]. Преимущества дисковых тормозов заключаются в следующем.

1. Возможность при одинаковых габаритах получения поверхности трения значительно большей, чем у колодочных и ленточных тормозов. Это позволяет использовать дисковый тормоз при меньшем давлении между фрикционными поверхностями, что повышает их износостойкость и срок службы.

2. Уравновешенность тормоза, так как осевые силы могут быть замкнуты внутри тормоза и не передаваться на вал и подшипники электродвигателя.

3. Высокая равномерность распределения давления по всей поверхности трения, что обуславливает более равномерный износ фрикционных поверхностей.

4. Незначительное тепловое расширение трущихся элементов в осевом направлении, что не оказывает влияние на качество сопряжения тормозных поверхностей.

5. Независимость величины тормозного момента от направления вращения.

6. Относительная легкость защиты тормоза от пыли, грязи и влаги.

Основные области применения АД с дисковыми тормозами:

- блокировка механизмов и противодействие крутящему моменту, созданному этими механизмами в момент исчезновения напряжения питания (станки, роботы, электрические тали, подъемные краны, транспортные лифты и т.п.);

- остановка движущихся механизмов в определенное время или в определенном положении (конвейеры, станки с ЧПУ, роботы и манипуляторы, намоточные станки, ткацкие станки, задвижки и т.п.);
- сокращение к требуемому минимуму времени выбега при циклической работе (быстроходные станки, станки для дерева и металлов);
- аварийное торможение с целью предотвращения несчастных случаев (эскалатор, мешалки, оборудование, действующее в автоматическом цикле);
- применяются везде, где требуется остановка приводной системы в определенном положении или времени.

Растормаживающие электромагниты, используемые в настящее время в электродвигателях, выполняются как на переменный, так и на постоянный ток. Наиболее перспективными являются ЭМТУ, привод которых содержит электромагнит со встроенным выпрямителем, характеристики которого близки к характеристикам электромагнитов постоянного тока. Это объясняется тем, что по сравнению с электромагнитами переменного тока они имеют следующие преимущества.

1. По крайней мере в два раза лучшее использование стали, что обеспечивает значительное снижение массогабаритных показателей.
2. Отсутствие потерь на вихревые токи и на перемагничивание, что снижает потребление энергии и нагрев ЭМТУ, а также позволяет делать магнитопровод нешихтованным из конструкционной стали.
3. Меньшая пульсация электромагнитной силы.
4. Резкое возрастание электромагнитной силы при уменьшении рабочего воздушного зазора, что позволяет использовать принцип форсировки срабатывания, а также увеличивает надежность работы ЭМТУ в расторможенном состоянии при механических воздействиях (удары, вибрация).

К недостаткам электромагнитов со встроенными выпрямителями можно отнести худшее быстродействие по сравнению с электромагнитами переменного тока. Но этот недостаток легко устранить путем использования специальных схем управления.

Учитывая изложенное, в качестве предпочтительной конструктивной модификации ЭМТУ используют дисковые электромеханические тормозные устройства с осевым нажатием, выполненные с приводом от электромагнита выпрямленного тока. Тормозной АД в собранном виде показан на рис. 7.3.



Рис. 7.3. Тормозной электродвигатель (кожух вентилятора снят)

На рисунке 7.4 показан ЭМТУ с двумя парами тормозных поверхностей, встраиваемый в серийный двигатель тормозной модификации типа 4А100Е.

Растормаживающий электромагнит состоит из магнитопровода 1, обмотки 2 и якоря 3, имеющего возможность аксиально перемещаться по направляющим штифтам 4. В состав фрикционного узла входит тормозной диск 5, на котором закреплены две тормозные накладки 6, и две неподвижные поверхности трения: поверхность 7 корпуса 8 и торцевая поверхность якоря 3. Тормозной диск 5 установлен на валу с помощью шлицевого соединения и посредством пружин 9 зажат между тормозной поверхностью 7 и якорем 3. Величина тормозного усилия, создаваемого пружинами 9, регулируется пробкой 10, которая при вкручивании в магнитопровод 1 посредством шариков сжимает пружины 9, расположенные в гнездах магнитопровода. Воздушный зазор между якорем и магнитопроводом регулируется путем подбора шайб 11, которые надеваются на винт 12.

Таким образом, ЭМТУ крепится к заднему подшипниковому щиту и размещено под кожухом обычно со стороны, противоположной рабочему выходному концу вала. Все основные узлы тормозного устройства размещены под кожухом. Такая компоновка позволяет рассеивать выделяющееся в процессе торможения тепло непосредственно на тормозном диске. При этом не происходит перегрева обмоток статора и ротора, что существенно продлевает рабочий ресурс электрической машины в целом.

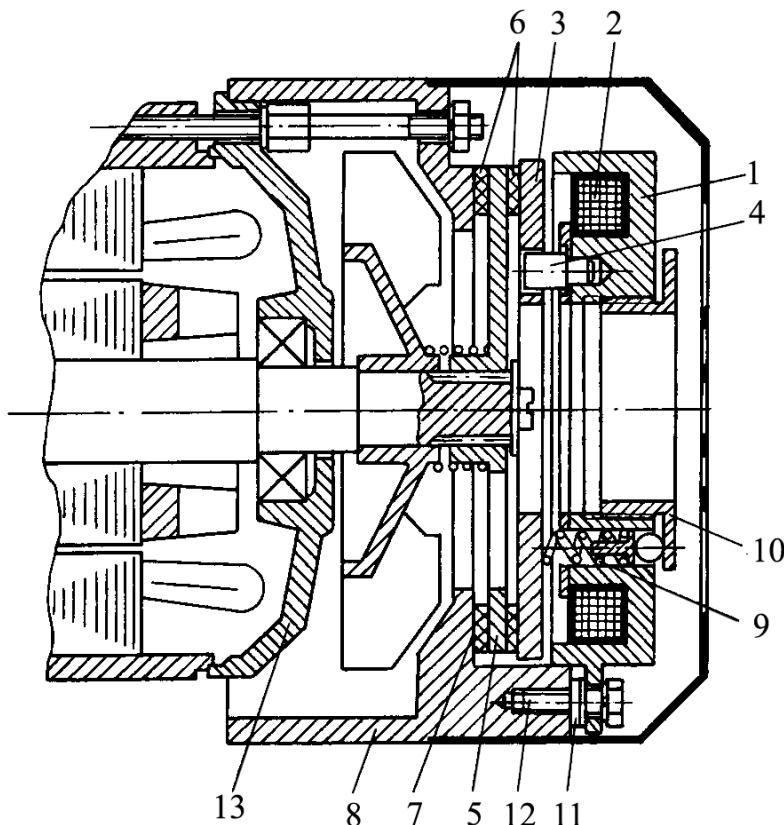


Рис. 7.4. Однодисковый тормоз с двумя парами тормозных поверхностей, встраиваемый в электродвигатель 4А100Е

7.3. Расчет параметров быстродействия электромеханического тормозного устройства

Тормозные электродвигатели предназначены, как уже говорилось, для работы в позиционных электроприводах с частыми пусками и принудительными остановками с последующей фиксацией ротора в заторможенном состоянии за счет наличия ЭМТУ. Поэтому основными эксплуатационными параметрами ЭМТУ являются номинальный тормозной момент $M_{t,nom}$, а также параметры быстродействия, т.е. время размыкания и замыкания фрикционного узла. Следовательно, при проектировании таких электродвигателей необходимо иметь математические зависимости, которые связывают параметры быстродействия ЭМТУ с геометрическими размерами и обмоточными данными растормаживающего электромагнита (РЭ).

7.3.1. Расчет времени размыкания фрикционного узла

Известно, что система уравнения, описывающая электромагнитные процессы, происходящие при включении РЭ, имеет вид:

$$U(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt}; \quad (7.3)$$

$$W \cdot i(t) = R_m(t) \cdot \Phi(t), \quad (7.4)$$

где $U(t)$ – мгновенное значение приложенного к обмотке напряжения; L и R – индуктивность и активное сопротивление обмотки РЭ; $i(t)$ – мгновенное значение тока в обмотке; W – число витков; $R_m(t)$ – полное сопротивление магнитной цепи; $\Phi(t)$ – мгновенное значение магнитного потока; t – время.

Выражение для времени размыкания t_p ЭМТУ, которое, в сущности, является временем трогания якоря при включении, можно получить следующим образом. Как следует из принципа работы ЭМТУ, за время t_p ток в обмотке РЭ должен возрасти до такого значения, чтобы соответствующее ему тяговое усилие F_{m_p} ,

развиваемое электромагнитом, стало равным усилию тормозных пружин $F_{\text{пр}}$, т.е. $F_{\text{ЭМ}} = F_{\text{пр}}$. Обозначим этот ток через $i_{\text{тр}}$ (ток трогания). Тогда из (7.3) имеем:

$$t_{\text{p}} = \int_0^{i_{\text{tp}}} \frac{L}{U - iR} di = \frac{L}{R} \ln \frac{U}{U - R \cdot i_{\text{tp}}} = \frac{L}{R} \ln \frac{i_y}{i_y - i_{\text{tp}}}, \quad (7.5)$$

где $i_y = U/R$ – установившееся значение тока в обмотке РЭ при $t = \infty$.

Примем, что магнитная система ЭМТУ ненасыщена. Тогда выражение (7.5) примет вид:

$$t_{\text{p}} = \frac{L}{R} \ln \frac{B_y}{B_y - B_{\text{тр}}}, \quad (7.6)$$

где B_y – установившаяся магнитная индукция в зазоре $\delta = \delta_n$ при $i = i_y$; $B_{\text{тр}}$ – индукция трогания, т.е. индукция в зазоре $\delta = \delta_n$ при $i = i_{\text{tp}}$.

Для дальнейшего анализа приведем уравнение (7.6) к более удобному виду. Для этого примем во внимание, что

$$L = W^2 / R_m = \frac{W^2 \cdot \mu_o S_n}{2 \cdot \delta_p}; \quad (7.7)$$

$$R = \rho \frac{l}{S_{\text{np}}} = \rho \frac{l_{\text{cp}} \cdot W}{S_{\text{np}}}, \quad (7.8)$$

где R_m – магнитное сопротивление магнитной цепи электромагнита; l_{cp} – средняя длина витка обмотки; W – число витков обмотки; S_n – площадь полюса магнитопровода; S_{np} – сечение проводника; ρ – удельное сопротивление материала обмотки.

Обозначения геометрических размеров, используемых в (7.7) и (7.8), соответствуют рис. 7.5.

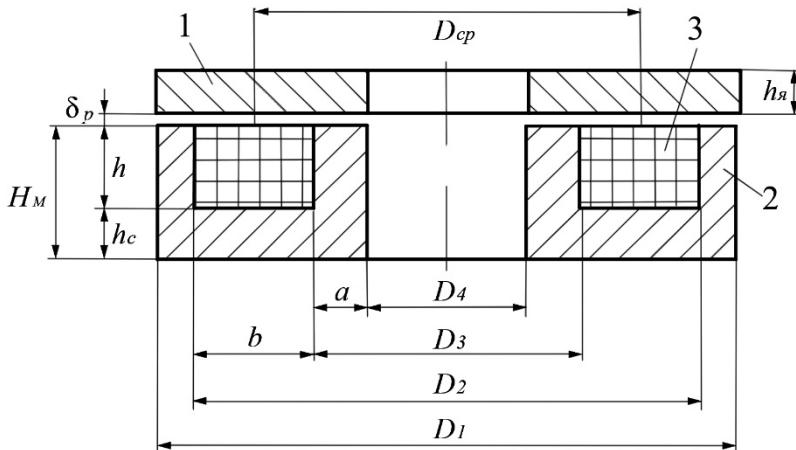


Рис. 7.5. Размеры магнитной системы РЭ:
1 – якорь; 2 – магнитопровод; 3 – обмотка

Исходя из рис. 7.5 имеем:

$$l_{cp} = \pi D_{cp}; \quad D_{cp} = (D_2 - D_3) / 2, \quad (7.9)$$

где D_{cp} – средний диаметр обмотки РЭ.

С учетом возможного пристраивания ЭМТУ к электродвигателю имеем:

$$D_1 = (1,6 \dots 1,9) \cdot h; \quad D_4 \approx D_{n,y}, \quad (7.10)$$

где D_1 и D_4 – наружный и внутренний диаметры магнитопровода растормаживающего электромагнита; h и $D_{n,y}$ – высота оси вращения и наружный диаметр подшипникового узла электродвигателя.

Чтобы обеспечить одинаковое насыщение наружного и внутреннего полюсов магнитопровода при протекании по ним магнитного потока Φ их площади должны быть одинаковыми, следовательно, имеем:

$$S_n = S/2. \quad (7.11)$$

Требуемое сечение $S_{\text{пп}}$ обмотки РЭ можно выразить следующим образом:

$$S_{\text{пп}} = i_y / j, \quad (7.12)$$

где i_y и j – ток и допустимая плотность тока в обмотке РЭ в установившемся режиме работы (т.е. в режиме, когда якорь притянут к магнитопроводу).

В свою очередь, на основании закона полного тока, установившийся ток i_y связан с величиной установившейся индукции B_y зависимостью

$$i_y = \frac{B_y \cdot 2\delta_p}{\mu_0 W}. \quad (7.13)$$

Примем, что индукция в воздушном зазоре РЭ распределена равномерно, тогда тяговое усилие равно:

$$F_{\text{эм}} = \frac{B^2}{2\mu_0} S. \quad (7.14)$$

Поскольку в момент трогания якоря выполняется условие $F_{\text{эм}} = F_{\text{пп}}$, то из формулы (7.14) имеем:

$$B_{\text{tp}}^2 = \frac{2\mu_0 F_{\text{пп}}}{S_{\text{пп}}}. \quad (7.15)$$

Тогда с учетом выражений (7.7) – (7.15) уравнение (7.6) для определения времени размыкания примет вид:

$$t_p = A_p \frac{B_y}{B_{\text{tp}}^2} \cdot \ln \left(\frac{B_y}{B_y - B_{\text{tp}}} \right), \quad (7.16)$$

где A_p – постоянный коэффициент, который однозначно определяется конструктивными параметрами РЭ:

$$A_p = \mu_0 F_{\text{пп}} / (j \rho D_{\text{cp}}). \quad (7.17)$$

Уравнение (7.16) позволяет при заданных значениях напряжения и времени размыкания t_p спроектировать ЭМТУ с минимальными размерами и потребляемой мощности.

Требуемое осевое усилие тормозных пружин можно определить исходя из заданного номинального тормозного момента $M_{t,h}$

$$F_{np} = \frac{M_{t,h}}{Z \cdot k_{tp} \cdot R_{cp} \cdot k_z}, \quad (7.18)$$

где R_{cp} – средний радиус действия силы трения во фрикционном узле.

Из (7.17) видно, что величину коэффициента A_p можно вычислить по исходным данным, т.е. по величинам тормозного момента $M_{t,h}$ и габаритам электродвигателя, для которого проектируется ЭМТУ. Следовательно, из (7.16) видно, что время размыкания t_p зависит, в сущности, только от двух параметров, а именно, от индукции трогания B_{tp} и установившейся индукции B_y .

Исходя из рассмотренных выше режимов работы РЭ можно увидеть следующее:

- установившаяся индукция B_y пропорциональна i_y , и поэтому определяет потребляемую мощность РЭ при разомкнутом положении фрикционного узла ЭМТУ;

- величина индукции трогания B_{tp} определяет габариты магнитопровода РЭ. Это объясняется тем, что, согласно (7.15), она зависит от суммарной площади полюсов S_p магнитопровода.

Графическая интерпретация времени растормаживания t_p ЭМТУ как функция двух переменных B_y и B_{tp} в относительных единицах показана на рис. 7.6. Видно, что разным сочетаниям величин индукций B_{tp} и B_y соответствует варианты ЭМТУ с различными эксплуатационными параметрами, а именно, с различными значениями времени растормаживания t_p , потребляемой мощности, габаритами и расходом активных материалов.

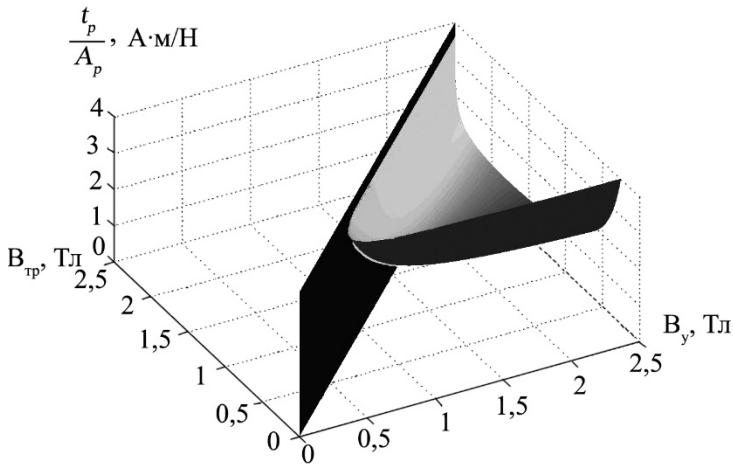


Рис. 7.6. Зависимость времени растормаживания ЭМТУ в относительных единицах в функции индукций B_{tp} и B_y

Определим координаты той точки, которая соответствует ЭМТУ с наиболее оптимальными технико-экономическими показателями. Для этого определим экстремум функции (7.16), при котором УЭ будет иметь минимальные габариты и потребляемую мощность:

$$2 \cdot t_p B_{tp}^* - A_p \cdot B_y^* / (B_y^* - B_{tp}^*) = 0, \quad (7.19)$$

где B_{tp}^* и B_y^* – координаты точки экстремума.

Из уравнения (7.19) получаем:

$$B_y^* = 2 \cdot t_p B_{tp}^{*2} / (2 \cdot t_p B_{tp}^* - A_p). \quad (7.20)$$

Если подставить (7.20) в (7.16), то получим:

$$\ln \frac{2t_p \cdot B_{tp}^*}{A_p} = \frac{t_p B_{tp}^*}{A_p} - 0,5. \quad (7.21)$$

Приближенное решение трансцендентного уравнения (7.21) имеет вид:

$$B_{\text{tp}}^* = 1,75 \cdot A_p / t_p. \quad (7.22)$$

Тогда из (7.20) с учётом (7.22) имеем:

$$B_y^* = 2,45 \cdot A_p / t_p. \quad (7.23)$$

Таким образом, по выражениям (7.22) и (7.23) можно при заданной величине времени размыкания ЭМТУ определить координаты точки, которой соответствует электромагнит с оптимальными параметрами. Из (7.22) и (7.23) следует, что оптимальный коэффициент запаса срабатывания равен:

$$K_{\text{з.с.опт}} = B_y^* / B_{\text{tp}}^* = 1,4. \quad (7.24)$$

Полученные выражения для определения координат точки экстремума функции $B_y = f(B_{\text{tp}})$ позволяют по заданной величине времени растормаживания t_p получить ЭМТУ с оптимальными параметрами. Действительно, из рис.7.6 видно, что точка экстремума имеет минимальное значение установившейся индукции B_y . Тогда из выражения (7.13) следует, что в этом случае будут минимальны потребляемый ток i_y и пропорциональная ему мощность. При этом сечение провода обмотки $S_{\text{пр}}$ будет также иметь минимальное значение и, соответственно, сечение паза для размещения обмотки тоже будет минимальным. Это обеспечит минимально возможные габариты ЭМТУ в целом. Если в исходных данных на разработку ЭМТУ задана величина M_t , то по уравнению (7.1) необходимо сначала определить требуемое усилие тормозных пружин $F_{\text{пр}}$, а затем по полученным выражениям можно вычислить величину t_p , индукцию B_y и, соответственно, установившийся ток i_y , потребляемую мощность и сечение обмотки $S_{\text{пр}}$.

Из полученных уравнений можно получить, что оптимальное значение индуктивности $L_{\text{опт}}$ электромагнита равно:

$$L_{\text{опт}} = 0,8 \cdot R \cdot t_p. \quad (7.25)$$

7.3.2. Расчет времени замыкания фрикционного узла при торможении

Быстродействие ЭФТУ при торможении, т.е. время замыкания t_3 фрикционного узла, вычисляется с учетом времени трогания якоря $t_{\text{тр.откл}}$ при отключении. При этом необходимо учесть особенности схемы питания РЭ.

Схема подключения обмотки РЭ через однополупериодный выпрямитель показана на рис. 7.7.

Обычно отключение обмотки РЭ производится путем разрыва электрической цепи между источником питания и выпрямителем контактами 3. В этом случае по контуру «обмотка РЭ 1 – шунтирующий диод 5» в течение определенного времени будет протекать ток, который будет поддерживаться энергией, запасенной в магнитном поле магнитопровода РЭ. Уравнение электрической цепи в этом случае имеет следующий вид:

$$R \cdot i(t) + L_0 \frac{di(t)}{dt} = 0, \quad (7.26)$$

где L_0 – индуктивность магнитной системы при эквивалентном остаточном зазоре $\delta = \delta_0$.

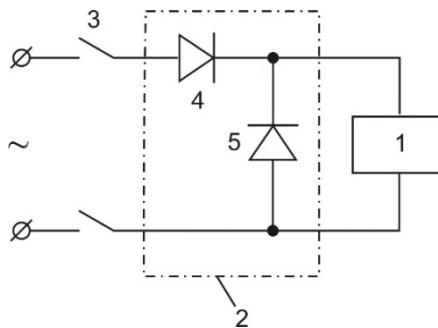


Рис. 7.7. Схема подключения обмотки РЭ:

- 1 – обмотка;
- 2 – однополупериодный выпрямитель;
- 3 – контакты коммутационного аппарата;
- 4 – последовательно включенный рабочий диод;
- 5 – шунтирующий диод

Величина остаточного зазора δ_o , т.е. эквивалентный технологический воздушный зазор между якорем и магнитопроводом при замкнутом фрикционном узле, определяется качеством изготовления элементов этого узла.

Тогда из уравнения (7.26) получим:

$$t_3 = -\frac{L_o}{R} \int_{i_y}^{i_{\text{тр.отк}}} di / i = \frac{L}{R} \ln \frac{i_y}{i_{\text{тр.отк}}}. \quad (7.27)$$

При решении уравнения (7.27) учтем, что в магнитной цепи РЭ при притянутом к магнитопроводу якоре будет присутствовать остаточный зазор $\delta = \delta_o$. Даже при небольшом численном значении δ_o падение магнитного потенциала в нем будет сопоставимым с падением магнитного потенциала в магнитопроводе. С учетом этого, уравнение (7.7) для этого режима работы будет иметь следующий вид

$$L_o = \frac{W^2}{R_{\text{мо}}} = \frac{W^2}{\frac{2\delta_o}{\mu_0 S_n} + \frac{l_m}{\mu_{\text{ср}} S_n}} = \frac{W^2 \cdot \mu_0 S_n}{2\delta_o K}, \quad (7.28)$$

$$\text{где } K = 1 + \frac{l_m}{2\delta_o} \cdot \frac{\mu_0}{\mu_{\text{ср}}}.$$

Тогда проведя преобразования уравнения (7.27), аналогичные тем, которые использовались при решении уравнения (7.5), получим:

$$t_3 = A_3 \frac{B_{y3}}{B_{\text{тр}}^2} \ln \frac{B_{y3}}{B_{\text{тр}}}, \quad (7.29)$$

где B_{y3} и A_3 – установившаяся индукция и конструктивный коэффициент при притянутом к магнитопроводу якоре (при $\delta = \delta_o$):

$$A_3 = \frac{A_p}{K}.$$

В теории тормозных устройств используют относительный параметр, называемый коэффициентом запаса удержания $K_{3,y}$:

$$K_{3,y} = B_{y,z} / B_{\text{тр}}. \quad (7.30)$$

Анализ серийных ЭМТУ различных типов показал, что наиболее оптимальное численное значение коэффициента $K_{3,y}$ находится в пределах

$$K_{3,y,\text{опт}} = 1,3 \dots 1,5.$$

Однако при анализе режиме размыкания фрикционного узла было получено (см. выражение (7.24)), что для обеспечения высоких параметров быстродействия целесообразно при проектировании ЭМТУ обеспечить величину коэффициента запаса растормаживания, равную $K_{3,c,\text{опт}} = 1,4$. Учтем, что в режиме замыкания фрикционного узла после подачи питания на обмотку РЭ его якорь притягивается к магнитопроводу, за счет чего в магнитной цепи ЭМТУ воздушный зазор уменьшится от $\delta = \delta_p$ до $\delta = \delta_o$. Поэтому численное значение установившейся индукции, соответственно, возрастет с B_y до величины $B_{y,z}$. Тогда в соответствии с (7.30) видно, что коэффициент $K_{3,y}$ будет значительно больше коэффициента $K_{3,c,\text{опт}}$, т.е. получим, что $K_{3,y} \gg K_{3,c,\text{опт}}$. Таким образом видно, что, в режиме удержания целесообразно снижать величину $B_{y,z}$, что можно обеспечить за счет применения схем питания УЭ с форсировкой [13], которые при растормаживании осуществляют подачу повышенного напряжения, прикладываемого к обмотке, с последующим автоматическим его снижением до величины, достаточной для удержания якоря в притянутом к магнитопроводу положении и обеспечению тем самым удержания фрикционного узла в разомкнутом состоянии.

Схемные решения процесса форсировки очень разнообразные. Возможно использование схем с двумя источниками питания, которые предусматривают подключение обмотки ЭМТУ при пуске двигателя и размыкании фрикционного узла к источнику повышен-

ного форсирующего напряжения с последующим её переключением после срабатывания электромагнита к источнику номинального напряжения. Однако для реализации такого способа форсировки требуется два источника питания с разным напряжением. Поэтому чаще в схемах форсировки обычно применяют управляемые выпрямители, построенные на тиристорах (рис. 7.8).

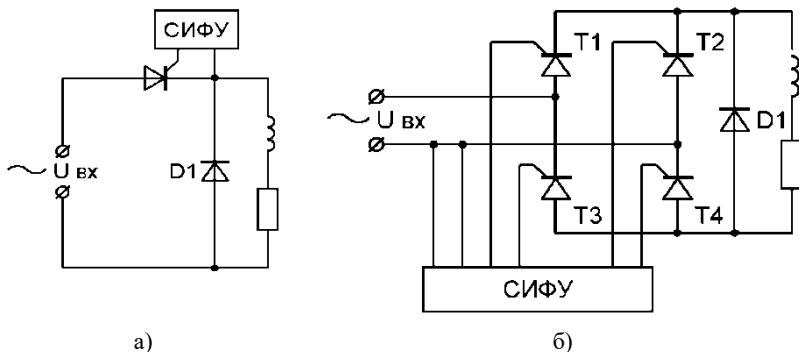


Рис. 7.8. Однофазные управляемые выпрямители на тиристорах:
а – однополупериодный; б – двухполупериодный

Более того, как следует из (7.29), в этом случае за счет снижения $B_{y,z}$ в режиме удержания будет также снижаться время замыкания фрикционного узла t'_3 , что обеспечивает улучшение эксплуатационных показателей ЭМТУ.

С учетом того, что величина индукции трогания B_{tp} рассчитывается по (7.22) или (7.15) по заданным исходным данным, то с учетом (7.29) и (7.30) зависимость времени замыкания t_3 от коэффициента $K_{3,y}$ будет иметь вид:

$$t_3 = A_3 \frac{K_{3,y}}{B_{tp}} \ln K_{3,y}. \quad (7.31)$$

Проведенный анализ показал, что при снижении величины $K_{3,y}$, что можно обеспечить путем приближения численного значения $B_{y,z}$ к B_{tp} , будет снижаться t'_3 . Это происходит за счет того,

что при снижении величины $K_{3,y}$, уменьшается время $t_3 = t'_3 \cdot A_3$, которое после отключения питания обмотки УЭ необходимо для снижения магнитной индукции в воздушном зазоре δ_0 на величину $\Delta B = B_{y,z} - B_{tp}$. При этом следует отметить, что уменьшение величины $K_{3,y} = B_{y,z} / B_{tp}$ значительно уменьшает устойчивость работы ЭМТУ в расторможенном состоянии, например, возможно возникновение дребезга якоря. Поэтому при проектировании ЭМТУ необходимо обеспечить величину $K_{3,y}$ большую, чем $K_{3,y,opt}$.

7.4. Методика и пример расчета пружинных электромеханических тормозных устройств для электродвигателей

Для удобства практического использования предлагаемой методики расчета ЭМТУ с источником тормозного усилия в виде витых тормозных пружин сжатия, совместим ее с примером расчета ЭМТУ для конкретного заданного электродвигателя.

Выполним расчет ЭМТУ для АД, рассчитанного в главе 4. В качестве исходных данных заданы следующие *параметры тормозной части*:

- коэффициент запаса торможения (кратность тормозного момента) $k_{3,t} = M_{t,n} / M_n = 1,7$;
- номинальное напряжение $U_n = 24$ В;
- время размыкания $t_p = 0,1$ с, не более;
- время замыкания $t_3 = 0,1$ с, не более.

7.4.1. Разработка конструкции и определение основных размеров тормоза

Конструкция и геометрические размеры ЭМТУ должны быть такие, чтобы обеспечивалась возможность его пристраивания к серийному электродвигателю базового исполнения при минимальной доработки последнего. Обычно такая доработка

сводится к выполнению на подшипниковом щите двигателя посадочного места и элементов крепления для установки растормаживающего электромагнита, удлинению вала со стороны вентилятора (например, посредством промежуточной втулки) для крепления вращающейся части ЭМТУ, а также увеличению длины кожуха вентилятора. При использовании электродвигателя с двумя выходными концами вала условия установки вращающейся части ЭМТУ значительно упрощаются.

Для устранения аксиальной нагрузки на подшипники электродвигателя используем однодисковую конструкцию ЭМТУ с двумя парами плоских поверхностей трения ($Z = 2$). Для обеспечения возможности установки ЭМТУ со стороны вентиляционного узла электродвигателя на вал 1 последнего устанавливается переходная втулка 2, удлиняющая вал (рис. 7.9).

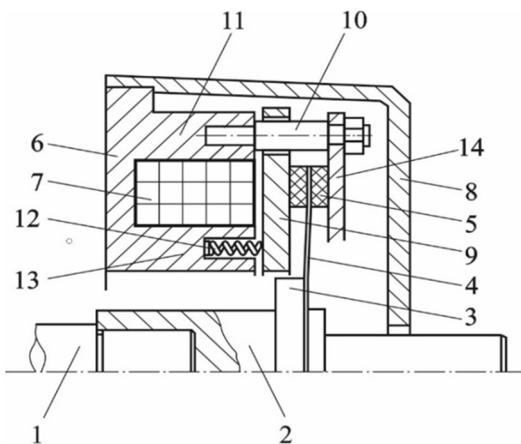


Рис. 7.9. Конструктивная компоновка тормозного устройства

На указанной втулке 2 выполнен буртик 3, к которому крепится упругий тормозной диск 4. К тормозному диску приклеены фрикционные накладки 5. Растормаживающий электромагнит, содержащий магнитопровод 6 с обмоткой 7, устанавливается на заднем подшипниковом щите двигателя под кожухом 8 тормоза. Якорь 9 электромагнита установлен с возможностью

перемещений в осевом направлении по направляющим штифтам 10, которые закреплены в верхнем полюсе 11 магнитопровода. Для равномерного распределения давления по поверхности трения тормозные пружины 12 расположены равномерно по окружности и размещены в пазах, выполненных во внутреннем полюсе 13 магнитопровода растормаживающего электромагнита. Усилием пружин 12 тормозной диск 4 зажат между якорем 9 и тормозным фланцем 14.

Проектирование растормаживающего электромагнита для ЭМТУ, встраиваемых в электродвигатели, имеет ряд особенностей в связи с конструктивными ограничениями как внешнего D_1 , так и внутреннего D_4 диаметров (рис. 7.5). Величина D_1 определяется высотой оси вращения электродвигателя, а D_4 – условиями компоновки тормозного узла. Фактически такое ограничение означает, что при проектировании могут варьироваться только высота паза h и два диаметральных размера D_2 и D_3 , однозначно определяющих как ширину паза b , так и площадь полюсов S_p . При этом и на них накладываются определенные ограничения: максимальная высота h лимитируется возможностью размещения ЭМТУ в зоне вентиляционного узла электродвигателя, а диаметры D_2 и D_3 совместно с D_1 и D_4 должны обеспечить площадь полюса S_p с оптимальным уровнем насыщения, а также оптимальные условия изготовления и размещения обмотки.

Таким образом, предельные диаметральные размеры ЭМТУ определяем из размеров электродвигателя.

Максимальный диаметральный размер тормозного узла выбираем равным наружному диаметру станины электродвигателя $D_{стан}$;

$$D_{стан} = D_{1АД} + 2 \cdot h_{стан} = 131 + 2 \cdot 4,5 = 140 \text{ мм};$$

$$D_{стан} = D_1 + 2 \cdot h_{стан} = 131 + 2 \cdot 4,5 = 140 \text{ мм},$$

где $D_{1АД}$ – наружный диаметр пакета статора АД (взят из параграфа 4.1, п.1); $h_{стан}$ = (0,05...0,07) h – толщина станины.

Тогда максимально возможный наружный диаметр внешнего полюса:

$$D_1 = D_{\text{стан}} - (0,06 \dots 0,10) \text{м} = 0,140 - 0,08 = 0,132 \text{ м.}$$

Внутренний диаметр D_4 внутреннего полюса складывается из следующих составляющих:

- 1) диаметр выходного конца вала $d_{\text{в}} = 0,018 \text{ м};$
- 2) удвоенная толщина стенок переходной втулки $2 \cdot a_{\text{вт}} = 2 \cdot 0,007 = 0,014 \text{ м};$
- 3) удвоенная высота буртика на втулке, при этом высота буртика H_6 определяется размером крепежных винтов (M5) и равна $H_6 = 0,008 \text{ м.}$
- 4) удвоенная величина зазора между внутренним полюсом и переходной втулкой $2 \cdot \delta_{\text{вт}} = 2 \cdot 0,002 = 0,004 \text{ м.}$

Таким образом, получаем:

$$D_4 = 0,018 + 0,014 + 2 \cdot 0,008 + 0,004 = 0,052 \text{ м.}$$

Величина максимально возможного воздушного зазора между якорем и полюсами магнитопровода вычисляется по формуле:

$$\delta = \delta_{\text{нач}} + \Delta\delta,$$

где $\delta_{\text{нач}} = 0,0004 \text{ м}$ – начальный зазор; $\Delta\delta = 0,0005 \text{ м}$ – суммарный износ тормозных накладок за один межремонтный период.

Тогда получим $\delta = 0,0009 \text{ м} = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Воздушный зазор при притянутом якоре принимаем равным

$$\delta_o = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Требуемый номинальный тормозной момент ЭМТУ:

$$M_{\text{т.н}} = k_{\text{з.т}} \cdot M_{\text{н}} = 1,7 \cdot 7,75 = 13,1 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где $M_{\text{н}} = 9550 \cdot P_{\text{н}} / n_{\text{н}} = 9550 \cdot 0,75 / 924,5 = 7,75 \text{ Н}\cdot\text{м}$ – номинальный момент электродвигателя; $n_{\text{н}} = n_1(1 - s) = 1000 \cdot (1 - 0,0755) = 924,5 \text{ об/мин}$ – номинальная частота вращения (см. расчет рабочих характеристик §4.7).

7.4.2. Расчет тормозного фрикционного узла

Исходя из особенностей работы ЭМТУ для электродвигателей, принимаем, что фрикционные накладки, закрепленные на тормозном диске, выполнены из асбополимерных материалов, например, из материала марки 6ЛП-55, имеющего коэффициент трения $k_{\text{тр}} = 0,35$.

1. Определяем максимально возможный наружный радиус R_h наружного полюса и якоря

$$R_h = (0,8 \dots 0,9)h_{\text{вр}} = (0,8 \dots 0,9) \cdot 80 = 64 \dots 72 \text{ мм.}$$

Принимаем $R_h = 66$ мм. Отметим, что именно при таком значении R_h полученная выше величина D_1 численно равна значению:

$$D_1 = 2R_h = 2 \cdot 66 = 132 \text{ мм.}$$

Однако, исходя из выбранной конструктивной компоновки тормоза, наружный радиус тормозного диска и тормозной накладки должны быть меньше D_1 из-за наличия направляющих штифтов 7 (рис. 7.9). Диаметр штифтов для тормозов рассматриваемого класса обычно равен $d_{\text{ш}} = (5 \dots 6) \cdot 10^{-3}$ м. Тогда предварительно наружный диаметр тормозной накладки можно вычислить по следующему соотношению:

$$\begin{aligned} D_{\text{т.н}} &= D_1 - 2d_{\text{ш}} - (10 \dots 20) \text{мм} = \\ &= 132 - 2 \cdot (5 \dots 6) - (10 \dots 20) = 100 \dots 112 \text{ мм.} \end{aligned}$$

Предварительная ширина тормозной накладки $b_{\text{пп}}$:

$$b_{\text{т.н.}} = (0,15 \dots 0,25)R_h = (0,15 \dots 0,25) \cdot 66 = 9,9 \dots 16,5 \text{ мм.}$$

С учетом рассчитанных значений выбираем по ГОСТу 1786-95 ближайшую стандартную тормозную накладку со следующими размерами:

- наружный диаметр $D_{\text{т.н.}} = 0,105$ м;
- ширина $b_{\text{т.н.}} = 0,01$ м.

2. Требуемое осевое усилие тормозных пружин:

$$F_{\text{пп}} = \frac{M_{\text{т.н}}}{Z \cdot k_{\text{пп}} \cdot R_{\text{cp}} \cdot k_z} = \frac{13,1}{2 \cdot 0,35 \cdot 0,0475 \cdot 1} = 390 \text{ Н.}$$

Здесь R_{cp} – средний радиус действия силы трения:

$$R_{\text{cp}} = (D_{\text{т.н}}/2) - (b_{\text{т.н}}/2) = (0,105/2) - (0,01/2) = 0,475 \text{ м.}$$

3. Примем, что ЭМТУ содержит $N = 6$ тормозных пружин, наружный диаметр которых равен $D = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Сначала выбираем класс пружин, который характеризует режим нагружения и выносливости. По условиям работы ЭМТУ выбираем винтовые цилиндрические пружины II класса, которые длительно пребывают в деформированном состоянии и периодически нагружаются. К этому классу относятся все статические пружины.

Сила одной пружины:

– при замкнутом ЭМТУ

$$F_1 = \frac{F_{\text{пп}}}{N} = \frac{390}{6} = 65 \text{ Н;}$$

– при разомкнутом ЭМТУ

$$F_2 = (1,05 \dots 1,1) F_1 = (1,05 \dots 1,1) \cdot 65 = (68,25 \dots 71,5) \text{ Н.}$$

Принимаем $F_2 = 70 \text{ Н.}$

Сила одной пружины при максимальной деформации:

$$F_3 = \frac{F_2}{1 - \delta_{\Pi}} = \frac{70}{1 - 0,05} = 73,7 \text{ Н,}$$

где δ_{Π} – относительный инерционный зазор пружины сжатия.

Для пружин сжатия II класса $\delta_{\Pi} = 0,05 \dots 0,25.$

4. Исходя из величины F_3 и наружного диаметра D , выбираем по ГОСТу 13775-86 стандартную пружину со следующими параметрами:

$$F_3 = 72 \text{ Н};$$

$D = 1,2 \cdot 10^{-3}$ м – диаметр проволоки;

$Z_1 = 65,95 \cdot 10^3$ Н/м – жесткость одного витка;

$f_3 = 1,441 \cdot 10^{-3}$ м – максимальная деформация одного витка.

5. Расчетное максимальное касательное напряжение при кручении

$$\tau_3 = 0,5 \cdot \delta_{\text{в}} = 0,5 \cdot 2200 \cdot 10^6 = 1100 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2.$$

6. Уточняем значение относительного инерционного зазора:

$$\delta_{\text{и}} = 1 - \frac{F_2}{F_3} = 1 - \frac{70}{72} = 0,028.$$

7. Критическая скорость пружины, соответствующая возникновению соударения витков пружины:

$$v_{\text{кр}} = \frac{\tau_3 \cdot \delta_{\text{и}}}{\sqrt{2 \cdot G \cdot \rho_c}} = \frac{1100 \cdot 10^6 \cdot 0,028}{\sqrt{2 \cdot 8 \cdot 10^{10} \cdot 8 \cdot 10^3}} = 0,86 \text{ м/с},$$

где G и ρ_c – модуль сдвига и динамическая (гравитационная) плотность материала пружины.

Для пружинной стали $G = 8 \cdot 10^{10}$ Н/м² и $\rho_c = 8 \cdot 10^3$ Н·с²/м⁴.

8. Жесткость пружин:

$$Z = \frac{F_2 - F_1}{h} = \frac{70 - 65}{0,9 \cdot 10^{-3}} = 5,5 \cdot 10^3 \text{ Н/м},$$

где $h = \delta_h = 0,9 \cdot 10^{-3}$ м – рабочий ход пружины.

9. Число рабочих витков пружины:

$$n_{\text{вп}} = \frac{Z_1}{Z} = \frac{65,95 \cdot 10^3}{5,5 \cdot 10 \cdot 10^3} \approx 12.$$

10. Наибольшая скорость перемещения подвижного конца пружины:

– при размыкании тормоза

$$v_{\text{оп}} = \frac{h}{t_p} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{0,05} = 1,58 \cdot 10^{-2} \text{ м/с};$$

– при замыкании тормоза:

$$v_{\text{оз}} = \frac{h}{t_3} = \frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{0,05} = 1,8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Так как $v_{\text{оп}} / v_{\text{кр}} < 1$ и $v_{\text{оз}} / v_{\text{кр}} < 1$, то соударение витков пружины при работе ЭМТУ отсутствует.

11. Уточняем жесткость пружины:

$$Z = \frac{Z_1}{n_{\text{вр}}} = \frac{65,95 \cdot 10^3}{12} = 5,49 \cdot 10^3 \text{ Н/м.}$$

12. Полное число витков:

$$n_1 = n_{\text{вр}} + n_2 = 12 + 1,5 = 13,5,$$

где $n_2 = 1,5$ – число опорных витков.

13. Уточняем силу F_2 при разомкнутом тормозе:

$$F_2 = P_1 + Z \cdot h = 65 + 5,49 \cdot 0,9 = 69,9 \text{ Н.}$$

14. Предварительная деформация пружины:

$$h_1 = \frac{F_1}{Z} = \frac{65}{5,49 \cdot 10^3} = 11,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

15. Рабочая деформация пружины:

$$h_2 = \frac{F_2}{Z} = \frac{70}{5,49 \cdot 10^3} = 12,75 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

16. Максимальная деформация пружины:

$$h_3 = \frac{F_3}{Z} = \frac{72}{5,49 \cdot 10^{-3}} = 13,1 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

17. Длины пружины при различных деформациях:
– при максимальной деформации

$$H_3 = (h_1 + 1 - n_3)d = (13,5 + 1 - 1,5) \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

– в свободном состоянии

$$H_0 = H_3 + h_3 = 15,6 \cdot 10^{-3} + 13,1 \cdot 10^{-3} = 28,7 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

– при предварительной деформации

$$H_1 = H_0 - h_1 = (28,7 - 11,8) \cdot 10^{-3} = 16,9 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

– при рабочей деформации

$$H_2 = H_0 - h_2 = (28,7 - 12,75) \cdot 10^{-3} = 15,95 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

18. Средний диаметр, шаг и длина развернутой пружины:

$$\begin{aligned} D_0 &= D - d = (8 - 1,2) \cdot 10^{-3} = 6,8 \cdot 10^{-3} \text{ м;} \\ t &= f_3 + d = (1,441 + 1,2) \cdot 10^{-3} = 2,641 \cdot 10^{-3} \text{ м;} \\ L &= 3,2 \cdot D_0 \cdot n_1 = 3,2 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3} \cdot 13,5 = 0,294 \text{ м.} \end{aligned}$$

19. Проверка правильности расчетов:

– жесткость пружины

$$Z = \frac{10^7 \cdot d^4}{D_0^3 \cdot n} = \frac{10^7 \cdot (1,2 \cdot 10^{-3})^4}{(6,8 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 12} = 5,5 \cdot 10^3 \text{ Н/м;}$$

– касательное напряжение

$$\tau_3 = k \frac{8 \cdot F_3 \cdot D_0}{\pi \cdot d^3} = 1,27 \frac{8 \cdot 72 \cdot 6,8 \cdot 10^{-3}}{\pi (1,2 \cdot 10^{-3})^3} = 916,8 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2,$$

где $k = \frac{4 \cdot c - 1}{4 \cdot c - 4} + \frac{0,615}{c} = \frac{4 \cdot 5,67 - 1}{4 \cdot 5,67 - 4} + \frac{0,615}{5,67} = 1,27$;

$$c = \frac{D_0}{d} = \frac{6,8 \cdot 10^{-3}}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 5,67.$$

Полученные значения соответствуют вычисленным ранее в п.11 и п.5.

7.4.3. Расчет размеров магнитопровода и обмоточных данных растормаживающего электромагнита

1. Ширина внутреннего полюса:

$$a_{\text{в}} = (0,2 \dots 0,3)D_4 = (0,2 \dots 0,3)0,052 = 0,01 \dots 0,015 \text{ м.}$$

Выбираем $a_{\text{в}} = 0,013 \text{ м.}$

2. Наружный диаметр внутреннего полюса:

$$D_3 = D_4 + 2 \cdot a_{\text{в}} = 0,052 + 2 \cdot 0,013 = 0,078 \text{ м.}$$

3. Общая площадь внутреннего полюса:

$$S'_{\text{п.в}} = \frac{\pi}{4} (D_3^2 - D_4^2) = \frac{\pi}{4} (0,078^2 - 0,052^2) = 2,66 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Внутренний полюс содержит шесть глухих отверстий для размещения тормозных пружин, наружный диаметр которых равен $D = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для исключения заедания пружин в пазах принимаем диаметр этих пазов равным:

$$D_{\text{паз}} = D + (1 \dots 1,5) \text{мм} = 8 + 1,3 = 9,3 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

где $D = 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – наружный диаметр тормозных пружин.

Суммарная площадь этих пазов:

$$S_{\text{паз}} = 6\pi D_{\text{паз}}^2 / 4 = 6\pi(9,3 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 0,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Тогда полезная площадь внутреннего полюса равна

$$S_{\text{п.в.}} = S'_{\text{п.в.}} - S_{\text{паз}} = (2,66 - 0,41) \cdot 10^{-3} = 2,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

4. Внутренний диаметр наружного полюса

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 - \frac{4}{\pi} \cdot S_{\text{п.н.}}} = \sqrt{0,132^2 - \frac{4}{\pi} \cdot 2,4 \cdot 10^{-3}} = 0,118 \text{ м},$$

где $S_{\text{п.н.}}$ – площадь наружного полюса.

Наружный полюс содержит три отверстия под штифты $d_{\text{ш.}} = (5 \dots 6) \cdot 10^{-3}$ м и три резьбовых отверстия под винты для ручного размыкания ЭМТУ при сборке $d_{\text{р.}} = (5 \dots 6) \cdot 10^{-3}$ м. Выбираем $d_{\text{ш.}} = 5 \cdot 10^{-3}$ м и $d_{\text{р.}} = 5 \cdot 10^{-3}$ м. Суммарная площадь этих отверстий:

$$\Delta S = 3 \frac{\pi}{4} (3d_{\text{ш.}}^2 + 3d_{\text{р.}}^2) = \frac{\pi}{4} (3 \cdot 0,005^2 + 3 \cdot 0,005^2) = 0,118 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

С учетом этого общая площадь наружного полюса равна

$$S_{\text{п.н.}} = S_{\text{п.в.}} + \Delta S = 2,25 \cdot 10^{-3} + 0,118 \cdot 10^{-3} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

5. Ширина наружного полюса:

$$a_{\text{н.}} = \frac{D_1 - D_2}{2} = \frac{0,132 - 0,118}{2} = 0,007 \text{ м.}$$

Полученная ширина полюса достаточна для выполнения в нем отверстий диаметром 0,005 м под штифты и резьбовые отверстия.

6. Высота стенки магнитопровода и толщина якоря:

$$h_c = h_a = \frac{S_n}{\pi \cdot D_3} (0,6...0,7) = \\ = \frac{2,28 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot 0,078} (0,6...0,7) = 0,056...0,0065 \text{ м.}$$

Принимаем $h_c = h_a = 0,006$ м.

7. Ширина паза под обмотку:

$$B = (D_2 - D_3) / 2 = (0,118 - 0,078) / 2 = 0,02 \text{ м.}$$

8. Средний диаметр обмотки:

$$D_{cp} = (D_2 + D_3) / 2 = (0,118 + 0,078) / 2 = 0,098 \text{ м.}$$

9. Число витков обмотки:

$$W = \frac{U}{j \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{cp}} = \frac{24}{6 \cdot 10^6 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 0,098} = 740.$$

10. Индукция трогания якоря:

$$B_{tp} = \sqrt{\frac{F_{np} \cdot \mu_0}{S_n}} = \sqrt{\frac{390 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2,28 \cdot 10^{-3}}} = 0,464 \text{ Тл.}$$

11. Установившаяся индукция:

$$B_y = 1,4B_{tp} = 1,4 \cdot 0,464 = 0,65 \text{ Тл.}$$

12. Ток в обмотке в установившемся режиме (при $\delta = \delta_h = 0,0009$ м):

$$I_y = \frac{2 \cdot \delta \cdot B_y}{\mu_0 \cdot W} = \frac{2 \cdot 0,0009 \cdot 0,65}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 740} = 1,26 \text{ А.}$$

13. Предварительные сечение и диаметр проводника обмотки:

$$S'_{\text{пп}} = I_y / j = 1,26 / 6 \cdot 10^{-6} = 0,21 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

$$d'_{\text{пп}} = \sqrt{\frac{4 \cdot S'_{\text{пп}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,21 \cdot 10^{-6}}{\pi}} = 0,517 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

14. С учетом полученных предварительных значений сечения и диаметра проводника выбираем ближайший стандартный проводник типа ПЭТВ, имеющий:

- номинальный диаметр неизолированного провода $d_{\text{пп}} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- среднее значение диаметра изолированного провода $d_{\text{пп.из}} = 0,545 \cdot 10^{-3} \text{ м};$
- сечение неизолированного провода $S_{\text{пп}} = 0,1963 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$

15. Глубина паза под обмотку:

$$h = \frac{W \cdot S_{\text{пр.из}}}{b \cdot k_3} = \frac{740 \cdot 0,233 \cdot 10^{-6}}{0,02 \cdot 0,6} = 14,4 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

16. Общая высота магнитопровода:

$$H = h_c + h = 0,006 + 0,0144 = 0,0204 \text{ м.}$$

7.4.4. Расчет режима срабатывания растормаживающего электромагнита

Одним из основных параметров, которые необходимо обеспечить при проектировании ЭМТУ, является время размыкания t_p , которое равно времени трогания якоря при включении t_{tp} :

$$t_p = A \frac{B_y}{B_{\text{tp}}} \cdot \ln \left(\frac{B_y}{B_y - B_{\text{tp}}} \right),$$

где $A = \mu_0 F_{\text{пп}} / (j \rho D_{\text{cp}})$ – постоянный коэффициент, определяемый конструктивными параметрами ЭМТУ; B_y – магнитная индукция в

зазоре $\delta = \delta_n$ при $I = I_y$; B_{tp} – магнитная индукция в зазоре $\delta = \delta_n$ при $I = I_{tp}$; $I_y = U/R$ – установившееся значение тока; I_{tp} – ток в обмотке растормаживающего электромагнита, при котором происходит трогание якоря.

1. Коэффициент A :

$$A = \frac{\mu_0 F_{np}}{j \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{cp}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 390}{6 \cdot 10^6 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 0,098} = 0,0152 \text{ Тл}\cdot\text{с.}$$

2. Время трогания якоря при включении:

$$t_{tp} = 1,75 A / B_{tp} = 1,75 \cdot 0,0152 / 0,464 = 0,057 \text{ с.}$$

Эта величина удовлетворяет заданному требованию по быстродействию размыкания ЭМТУ.

3. Потребляемая мощность:

$$P = U \cdot I_y = 24 \cdot 1,26 = 30,24 \text{ Вт.}$$

4. Поверхность обмотки:

$$S_{ob} = 2\pi D_{cp} (h + b) = 2\pi \cdot 0,098 \cdot (14,4 + 20) \cdot 10^{-3} = 0,021 \text{ м}^2.$$

5. Скорость охлаждающего воздуха определяется с использованием результатов вентиляционного расчета электродвигателя, где получено, что расход воздуха равен $Q = 0,0251 \text{ м}^3/\text{с.}$

Сечение воздухопровода в месте расположения ЭМТУ:

$$S = \frac{\pi}{4} (D_{кож.дб}^2 - D_{кож.т}^2) = \frac{\pi}{4} (0,18^2 - 0,138^2) = 0,0104 \text{ м}^3,$$

тогда скорость воздуха:

$$v = Q / S = 0,0251 / 0,0104 = 2,42 \text{ м/с.}$$

6. Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_0 \left(1 + 0,5\sqrt{V}\right) = 14 \left(1 + 0,5\sqrt{2,42}\right) = 24,9 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{град.}$$

7. Превышение температуры обмотки:

$$\Delta t_0 = P / (\alpha S_{\text{об}}) = 30,24 / (24,9 \cdot 0,021) = 57,8 \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

Такое превышение температуры допустимо для выбранного класса нагревостойкости изоляции B .

8. Активное сопротивление обмотки при 20°C :

$$R = \frac{\rho \cdot W \cdot \pi \cdot D_{\text{cp}}}{S_{\text{пр}}} = \frac{0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot 740 \cdot \pi \cdot 0,098}{0,1963 \cdot 10^{-6}} = 20,3 \text{ Ом.}$$

9. Индуктивность обмотки:

$$L = W^2 \cdot \mu_0 \frac{S_{\text{n}}}{2\delta} = 740^2 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{2,28 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 0,9 \cdot 10^{-3}} = 0,87 \text{ Гн.}$$

7.4.5. Расчет режима отключения растормаживающего электромагнита

Для расчета режима отключения растормаживающего электромагнита необходимо выполнить обратную задачу расчета его магнитной цепи.

1. Длина средней магнитной силовой линии по стали:

$$\begin{aligned} l_{\text{m}} &= 2 \cdot b + \frac{D_1 - D_2}{2} + \frac{D_3 - D_4}{2} + 2h + h_{\text{я}} + h_{\text{c}} = \\ &= 2 \cdot 0,02 + \frac{0,132 - 0,118}{2} + \frac{0,078 - 0,052}{2} + \\ &\quad + 2 \cdot 0,0144 + 2 \cdot 0,006 = 0,1008 \text{ м.} \end{aligned}$$

2. Результаты расчета магнитной цепи растормаживающего электромагнита при $\delta = \delta_0 = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м сведены в табл. 7.1. При этом для магнитопровода и якоря выбрана сталь марки 10.

Таблица 7.1

Расчет магнитной цепи

$\Phi, \text{Вб} \cdot 10^{-3}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5
$B, \text{Tл}$	0,439	0,658	0,877	1,096	1,316	1,535	1,754	1,974
$H_m, \text{А/м}$	230	317	456	677	996	2880	6720	15600
$H_m l_m, \text{А}$	23,18	31,95	45,96	68,24	100,4	29,03	677,4	1989
$H_\delta, \text{А/м} \cdot 10^6$	0,349	0,524	0,698	0,872	1,048	1,22	1,396	1,571
$2 H_\delta \delta_0, \text{А}$	69,8	104,8	139,6	174,5	209,5	244,3	279,3	314,3
$F, \text{А}$	92,98	136,7	185,56	242,74	309,9	534,6	956,6	1992,1
$i, \text{А}$	0,126	0,185	0,251	0,328	0,419	0,722	1,29	2,69

3. По данным табл. 7.1 строим зависимость $B = f(i)$, которая показана на рис. 7.10. По этой зависимости находим, что при токе $i_y = 1,26$ А индукция при $\delta = \delta_0$ будет равна $B'_y = 1,72$ Тл.

4. Абсолютная магнитная проницаемость магнитопровода:

$$\mu_{cr} = \frac{B'_y}{H_y} = \frac{1,72}{6000} = 0,287 \cdot 10^{-3} \text{ Гн/м},$$

где $H_y = 6000 \text{ А/м}$ – напряженность магнитного поля при $B'_y = 1,72 \text{ Тл}$, определенная по кривой намагничивания стали.

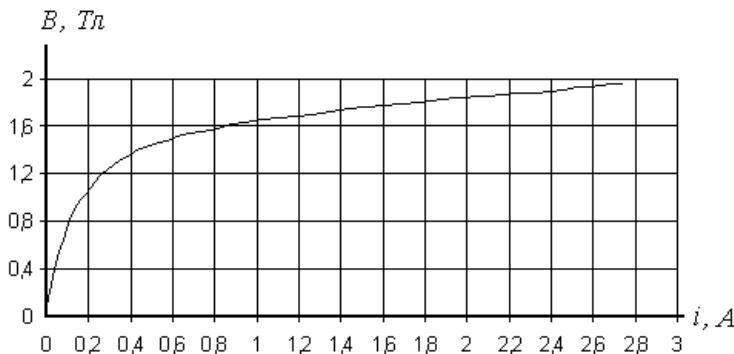


Рис. 7.10. Зависимость $B' = f(i)$ при $\delta = \delta_0$

5. Конструктивный коэффициент:

$$A_3 = \frac{A}{K} = \frac{A}{1 + \frac{l_M \cdot \mu_0}{2\delta_0 \cdot \mu_{ct}}} = \frac{0,0152}{1 + \frac{0,1008}{2 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{0,287 \cdot 10^{-3}}} = 0,0048 \text{ Тл} \cdot \text{с.}$$

6. Время замыкания ЭМТУ:

$$t_3 = A_3 \frac{B'_y}{B_{tp}^2} \cdot \ln \frac{B'_y}{B_{tp}} = 0,0048 \cdot \frac{1,72}{0,464^2} \cdot \ln \frac{1,72}{0,464} = 0,05 \text{ с.}$$

Это значение t_3 даже меньше, чем по заданию, следовательно, расчетные параметры быстродействия имеют определенный запас.

Таким образом, спроектированный электромеханический фрикционный тормоз полностью удовлетворяет исходному заданию. Можно ожидать, что даже несмотря на возможные и неизбежные отклонения технологических параметров от расчетных, рассчитанный ЭМТУ позволит разработать работоспособную тормозную модификацию АД.

7.5. Разработка конструкции тормозной модификации электродвигателя

На рисунке 7.11 показан продольный разрез электродвигателя, а на рис. 7.12 – вид сбоку с установочными и габаритными размерами. Пакет статора 9 с обмоткой запрессован в станину 10. На станине имеется коробка выводов 7, охлаждающие ребра и лапы. Подшипниковые щиты 4 и 14, прикреплены болтами 5 к станине 10. Магнитопровод ротора 11 напрессован на вал 2.

На заднем подшипниковом щите 14 сделано посадочное место, к которому болтами прикреплен фланец 15. На фланце установлен магнитопровод 16 растормаживающего электромагнита ЭМТУ. В пазу магнитопровода 16 расположена кольцевая обмотка 17.

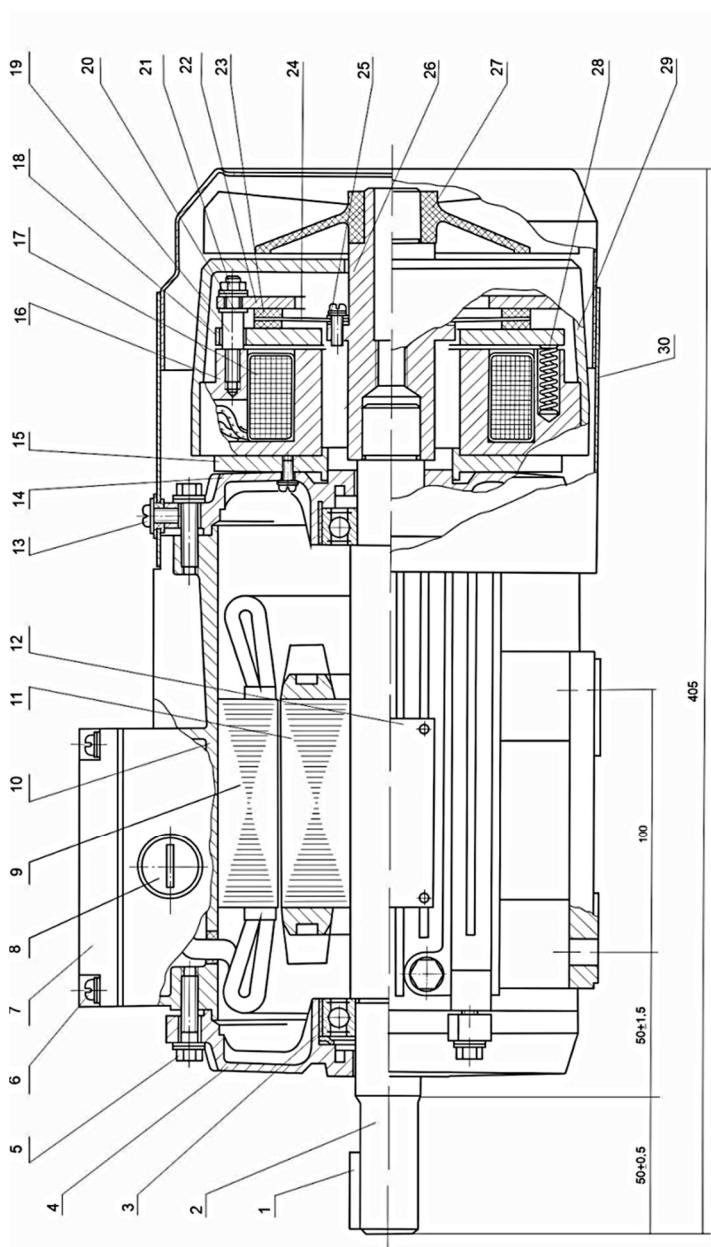


Рис. 7.11. Вид сбоку электродвигателя

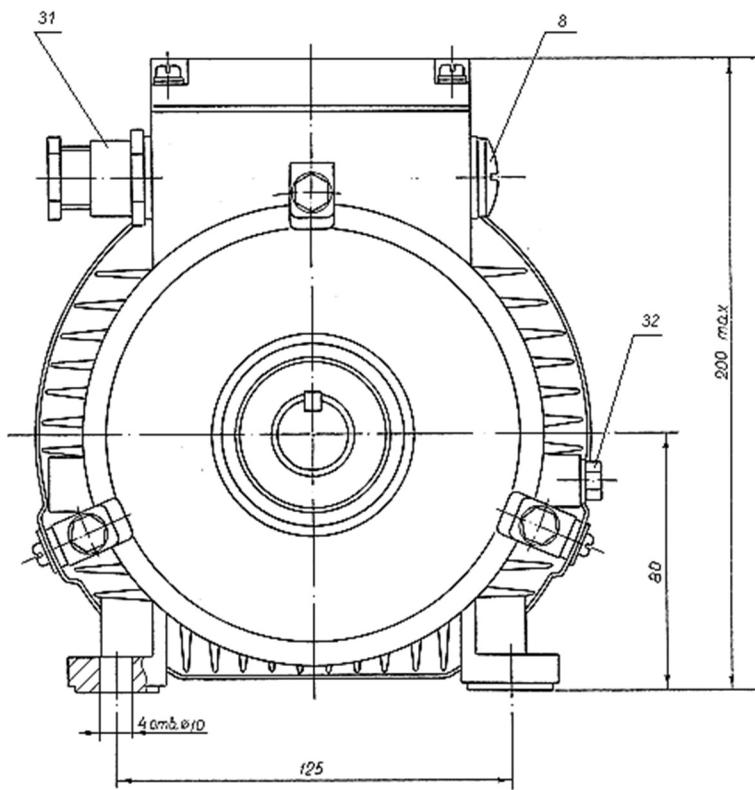


Рис. 7.12. Вид сбоку

Якорь 18 электромагнита установлен с возможностью перемещений в осевом направлении по направляющим штифтам 19, которые закреплены в верхнем полюсе магнитопровода 16. На концах штифтов 19 гайками 20 жестко закреплен тормозной фланец 22.

На удлиняющей втулке 26 электродвигателя установлена переходная втулка 26, удлиняющая вал. На указанной втулке 26 выполнен буртик, к которому винтами 25 крепится упругий тормозной диск 24. На тормозной диск приклеены фрикционные накладки 23. В верхнем полюсе магнитопровода 16 равномерно по окружности выполнены пазы. В пазах размещены тормозные пружины 28,

которые упираются в якорь 18. За счет усилия пружин 28 тормозной диск 24 зажат между якорем 18 и тормозным фланцем 22. Таким образом, создается две пары плоских поверхностей трения ($Z = 2$). Растворяющий электромагнит установлен на заднем подшипниковом щите двигателя под кожухом 29 тормоза.

На валу 2 закреплен центробежный вентилятор 27, который вместе с тормозом закрыт кожухом 30.

Вопросы и задания для самопроверки

1. В каких случаях и для чего применяют электрические машины, снабженные нормально замкнутыми фрикционными тормозами с электромагнитным приводом?
2. Опишите конструкцию и принцип работы электромеханических тормозных устройств для электродвигателей.
3. Какие типы растворяющих электромагнитов применяют в тормозных устройствах для электрических машин?
4. В чем заключаются преимущества дисковых тормозов?
5. Каковы области применения АД с дисковыми тормозами?
6. Какими параметрами характеризуются ЭМТУ?
7. В чем заключаются особенности расчета ЭМТУ для электродвигателей?
8. От чего зависит быстродействие тормоза?
9. Какие существуют схемные решения процесса форсировки срабатывания ЭМТУ?
10. Как и для чего производится расчет магнитной цепи растворяющего электромагнита?

Глава 8

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ТОРМОЗА С ИСТОЧНИКОМ ТОРМОЗНОГО УСИЛИЯ В ВИДЕ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

8.1. Базовые конструкции и особенности работы электромеханических тормозных устройств с постоянными магнитами

Основные тенденции развития электромеханических тормозов для электродвигателей связаны с повышением их энергоэффективности, надежности, расширением функциональности. Одним из путей улучшения эксплуатационных показателей ЭМТУ является использование в их приводе постоянных магнитов (ПМ). ЭМТУ с постоянными магнитами обладают, по сравнению с пружинными ЭМТУ, целым рядом преимуществ:

- отсутствие люфта вала электродвигателя при замкнутом фрикционном узле;
- высокое быстродействие при размыкании и замыкании фрикционного узла;
- низкое энергопотребление;
- высокий удельный тормозной момент;
- простота управления и длительность срока службы.

В настоящее время электродвигатели со встроенными электромеханическими тормозными устройствами с постоянными магнитами (ЭМТУ МП) используются в электроприводах различных автоматизированных и мехатронных систем, например, в станкостроении, робототехнике, авиации, специализированном технологическом оборудовании и др. В последние годы они завоевывают все новые, нетрадиционные для них области применения. Например, они применяются в медицинской технике для удержания в неподвижном положении рентгеновских устройств, в устройствах для компьютерной томографии и т.д. Это обуславливает интерес к разработке ЭМТУ такого типа.

В электромагнитных устройствах магнитное поле постоянного магнита используется для создания усилия между соответствующими конструктивными элементами, а обмотка управляющего электромагнита (УЭ) служит или для компенсации этого поля, или для изменения его направления.

На рисунке 8.1. изображена принципиальная компоновка основных активных частей однодискового тормоза или муфты (показано разомкнутое состояние фрикционного узла). Магнитная система состоит из магнитопровода УЭ, имеющего наружный 1 и внутренний 2 полюса и фланец 3, выполненные из магнитомягкой стали. Между полюсами размещена обмотка 4 и постоянный магнит 5. Дисковый якорь 6 закреплен на упругой мембране 7, которая посредством узла крепления 8 устанавливается на приводном валу. На рисунке 8.1 узел крепления 8 выполнен в виде цангового зажима.

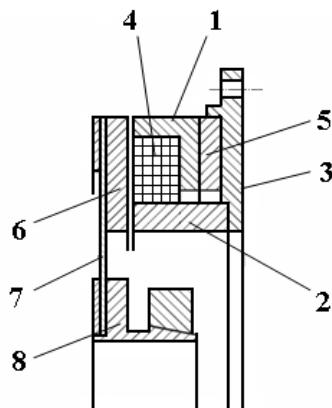


Рис. 8.1. Конструкция активных частей однодискового тормоза (муфты)

При отсутствии напряжения на обмотке 4 магнитный поток постоянного магнита 5 притягивает якорь 6 к полюсам 1 и 2 магнитопровода. Тем самым за счет сил трения между указанными элементами создается усилие сцепления. Это усилие может быть использовано или для передачи врачающего момента между

ведущим и ведомым валами (если данная конструкция используется для муфты), или для торможения (если, например, магнитопровод закреплен неподвижно).

При подключении обмотки 4 к источнику питания она создает магнитный поток, направленный встречно потоку постоянного магнита 5. Тем самым усилие притяжения якоря 6 к полюсам исчезает, и он под действием усилия упругой мембранны 7 отходит от магнитопровода. За счет этого муфта (или тормоз) размыкается.

Величина суммарного тягового усилия $F_t(\delta, i)$, действующего на якорь, зависит от воздушного зазора δ между якорем и магнитопроводом и от величины тока в обмотке УЭ и в общем случае имеет три составляющие:

$$F_t(\delta, i) = | F_m(\delta) - F_{em}(i, \delta) | - F_{pr}(\delta) \geq 0, \quad (8.1)$$

где $F_m(\delta)$ – тяговое усилие, действующее на якорь со стороны магнитного поля постоянного магнита Φ_{pm} и зависящее от воздушного зазора δ ; $F_{em}(i, \delta)$ – тяговое усилие, создаваемое управляемым электромагнитом и зависящее от величины тока в обмотке и от величины δ ; $F_{pr}(\delta)$ – усилие упругой мембранны, которое зависит от величины ее прогиба, то есть от величины перемещения якоря.

Тяговое усилие $F_m(\delta)$ определяется производной энергии магнитного поля $W_m(\delta)$, создаваемой постоянным магнитом в рабочем зазоре между якорем и магнитопроводом, по координате перемещения якоря:

$$F_m(\delta) = \frac{dW_m(\delta)}{d\delta} = \frac{B_m^2 S}{2\mu_0}. \quad (8.2)$$

Здесь $W_m(\delta)$ определяется по формуле:

$$W_m(\delta) = \frac{B_m H_m}{2} V_\delta, \quad (8.3)$$

где B_m и H_m – магнитная индукция и напряженность магнитного поля, создаваемые постоянным магнитом в рабочем зазоре; V_δ – объем пространства в рабочем зазоре, занятого полем;

$H_m = B_m / \mu_0$; $V_\delta = S \cdot \delta$; S – суммарная площадь полюсов магнитопровода; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

Тяговое усилие электромагнита $F_{\text{эм}}(i, \delta)$ равно:

$$F_{\text{эм}}(i, \delta) = 0,5(i \cdot W)^2 \frac{dG_\delta}{d\delta} = \frac{S_n \cdot B_\delta^2(t)}{\mu_0} = \frac{S_n \cdot \mu_0 \cdot W^2}{4\delta^2} i^2(t), \quad (8.4)$$

где $(i \cdot W)_\delta = \Phi_\delta / G_\delta$ – МДС обмотки управляющего электромагнита, приходящаяся на рабочий воздушный зазор δ ; Φ_δ – магнитный поток, создаваемый УЭ в воздушном зазоре между полюсами магнитопровода и якорем; G_δ – суммарная магнитная проводимость рабочего зазора δ .

На рисунке 8.2 показана зависимость усилия F_t от тока i обмотки. Здесь положительное направление тока i соответствует встречному направлению магнитных потоков $\Phi_{\text{пм}}$ и $\Phi_{\text{эл}}$.

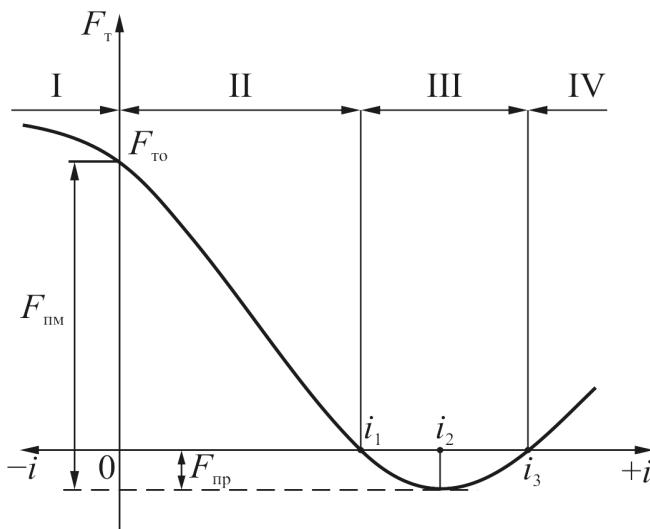


Рис. 8.2. Зависимость тягового усилия F_t от тока i в обмотке растормаживающего электромагнита

В области I потоки $\Phi_{\text{пм}}$ и $\Phi_{\text{эл}}$ действуют согласно, поэтому согласно (8.1) на якорь будет действовать тяговое усилие, равное

$$F_{\text{т}}^I(\delta_0, i) = F_{\text{м}}(\delta_0) + F_{\text{эм}}(i, \delta_0) - F_{\text{пр}}(\delta_0) \geq 0, \quad (8.5)$$

где δ_0 – остаточный эквивалентный технологический воздушный зазор между якорем и магнитопроводом при замкнутом фрикционном узле, величина которого зависит от чистоты обработки их со-прягаемых поверхностей и качества сборки фрикционного узла.

На границе областей I и II ток i отсутствует и тяговое усилие $F_{\text{т}}$ равно:

$$F_{\text{т}0} = F_{\text{м}}(\delta_0) - F_{\text{пр}}(\delta_0). \quad (8.6)$$

В областях II, III и IV потоки $\Phi_{\text{пм}}$ и $\Phi_{\text{эл}}$ действуют встречно, причем в диапазоне токов $0 < i < i_2$ поток постоянного магнита больше потока электромагнита $\Phi_{\text{пм}} > \Phi_{\text{эл}}$, при токе $i = i_2$ потоки равны $\Phi_{\text{пм}} = \Phi_{\text{эл}}$, а при токе $i > i_2$ имеем $\Phi_{\text{пм}} < \Phi_{\text{эл}}$.

В области II якорь за счет недокомпенсации потока $\Phi_{\text{пм}}$ потоком $\Phi_{\text{эл}}$ притянут к магнитопроводу усилием $F_{\text{т}}$, значение которого определяется избыточным потоком постоянного магнита (т.е. его некомпенсированной частью)

$$F_{\text{т}}^{II}(\delta_0, i) = F_{\text{м}}(\delta_0) - F_{\text{эм}}(i, \delta_0) - F_{\text{пр}}(\delta_0) \geq 0. \quad (8.7)$$

В области IV за счет перекомпенсации потока $\Phi_{\text{пм}}$ якорь притянут к магнитопроводу избыточным потоком электромагнита:

$$F_{\text{т}}^{IV}(\delta_0, i) = F_{\text{эм}}(i, \delta_0) - F_{\text{м}}(\delta_0) - F_{\text{пр}}(\delta_0) \geq 0. \quad (8.8)$$

Из рисунка 8.2 видно, что фрикционный узел будет разомкнут только в области III в диапазоне токов $i_1 < i < i_3$, определяем величиной силы $F_{\text{пр}}$, причем усилие, действующее на якорь, будет равно

$$F_{\text{т}}^{III}(\delta_p, i) = F_{\text{м}}(\delta_p) - F_{\text{эм}}(i, \delta_p) - F_{\text{пр}}(\delta_p) \geq 0, \quad (8.9)$$

где δ_p – рабочий воздушный зазор между якорем и магнитопроводом при разомкнутом фрикционном узле.

8.2. Расчет параметров возвратной пружины

В реальных условиях эксплуатации всегда имеет место определенный разброс тока обмотки, что обусловлено колебаниями напряжения сети и нестабильностью теплового состояния обмотки. Вследствие технологического разброса размеров магнитной цепи управляющего электромагнита и магнитных характеристик используемых в нем материалов, не может быть гарантировано значение потока Φ_{pm} постоянных магнитов. За счет увеличения усилия $F_{\text{пр}}$ можно обеспечить расширение диапазона токов $i_1 \dots i_3$, в котором разомкнутое состояние фрикционного узла ЭМТУ МП устойчиво. Это позволяет смягчить требования, предъявляемые как к условиям эксплуатации, так и к качеству изготовления ЭМТУ МП в целом. Однако очевидно, что с ростом $F_{\text{пр}}$ уменьшается тормозное усилие $F_{\text{т}}$.

Установим соотношение между требуемым усилием $F_{\text{пр}}$ возвратной пружины и границами допусков на отклонения указанных выше факторов от их номинальных значений.

В электромагнитных механизмах с постоянными магнитами магнитный поток $\Phi_{\text{эл}}$ электромагнита достаточно точно пропорционален току i его обмотки. Тогда максимальное $\Phi_{\text{эл},\text{max}}$ и минимальное $\Phi_{\text{эл},\text{min}}$ значения, ограничивающие возможные отклонения потока $\Phi_{\text{эл}}$ от его номинального значения $\Phi_{\text{ном}}$, определяются так:

$$\Phi_{\text{эл},\text{max}} = \Phi_{\text{ном}} K_{U,\text{max}}; \quad (8.10)$$

$$\Phi_{\text{эл},\text{min}} = \Phi_{\text{ном}} K_{U,\text{min}} / K_R, \quad (8.11)$$

где $K_{U,\text{max}} = U_{\text{max}} / U_{\text{ном}}$; $K_{U,\text{min}} = U_{\text{min}} / U_{\text{ном}}$; $K_R = R_{\text{г}} / R_{\text{x}}$; U_{max} и U_{min} – максимальное и минимальное значения ожидаемых колебаний напряжения сети; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети; $R_{\text{г}}$ – сопротивление обмотки в нагретом состоянии; R_{x} – сопротивление обмотки в холодном состоянии. В (8.10) учтено, что максимальное значение $\Phi_{\text{эл},\text{max}}$ будет именно при нахождении обмотки в холодном состоянии.

Примем, что номинальному уровню выделенных выше факторов соответствует полная компенсация в якоре потоков $\Phi_{\text{эл}}$ и $\Phi_{\text{пм}}$ в номинальном режиме работы, то есть $\Phi_{\text{эл}} = \Phi_{\text{пм}} = \Phi_{\text{ном}}$. Тогда максимальное $\Phi_{\text{пм},\text{max}}$ и минимальное $\Phi_{\text{пм},\text{min}}$ значения, ограничивающие применение $\Phi_{\text{пм}}$ от образца к образцу тормоза:

$$\Phi_{\text{пм},\text{max}} = \Phi_{\text{ном}} K_{\text{пм},\text{max}}; \quad (8.12)$$

$$\Phi_{\text{пм},\text{min}} = \Phi_{\text{ном}} K_{\text{пм},\text{min}}, \quad (8.13)$$

где $K_{\text{пм},\text{max}}$ и $K_{\text{пм},\text{min}}$ – коэффициенты, учитывающие технологический разброс параметров постоянных магнитов.

Из опыта проектирования, в большинстве случаев может быть принято:

$$K_{\text{пм},\text{max}} = 1,10 \dots 1,15; K_{\text{пм},\text{min}} = 0,85 \dots 0,9.$$

При наиболее неблагоприятных сочетаниях отклонений параметров от номинального уровня, значение Φ_o остаточного магнитного потока в якоре при размыкании фрикционного узла максимально и может достигать либо значения $(\Phi_{\text{пм},\text{max}} - \Phi_{\text{эл},\text{min}})$, либо $(\Phi_{\text{эл},\text{max}} - \Phi_{\text{эл},\text{min}})$. В первом случае поток постоянного магнита в якоре остается не полностью компенсированным, во втором – поток обмотки электромагнита превышает поток ПМ.

Наличие остаточного магнитного потока Φ_o обуславливает усилие P_o :

$$P_o = \Phi_o^2 / (\mu \cdot S_{\text{n}}), \quad (8.14)$$

которое удерживает якорь электромагнита притянутым к его полюсам, и фрикционный узел окажется разомкнутым лишь при $F_{\text{np}} > P_o$:

$$F_{\text{np}} > (K_{\text{пм},\text{max}} - K_{U,\text{min}} / K_R)^2 \cdot \Phi_{\text{ном}}^2 / (\mu_0 / S_{\text{n}}); \quad (8.15)$$

$$F_{\text{np}} > (K_{U,\text{max}} - K_{\text{пм},\text{min}})^2 \cdot \Phi_{\text{ном}}^2 / (\mu_0 / S_{\text{n}}), \quad (8.16)$$

где S_{n} – площадь полюса магнитопровода.

Величина $\Phi_{\text{ном}}^2 / (\mu_0 / S_{\text{п}})$ определяет усилие $F_{\text{пм}}$, развиваемое постоянным магнитом при отключенной обмотке управляющего электромагнита, т.е. при $\Phi_{\text{эл}} = 0$. Выразив $F_{\text{пм}}$ через усилие $F_{\text{т0}}$, равное при $\Phi_{\text{эл}} = 0$, разности ($F_{\text{пм}} - F_{\text{пр}}$), придадим следующий вид требованиям, предъявляемым к $F_{\text{пр}}$:

$$F_{\text{пр}} > \frac{F_{\text{т0}}(K_{\text{пм, max}} - K_{\text{U min}} / K_R)^2}{1 - (K_{\text{пм, max}} - K_{\text{U min}} / K_R)^2}; \quad (8.17)$$

$$F_{\text{пр}} > \frac{F_{\text{т0}}(K_{\text{U max}} - K_{\text{пм, min}})^2}{1 - (K_{\text{U max}} - K_{\text{пм, min}})^2}. \quad (8.18)$$

Здесь $F_{\text{т0}}$ вычисляют исходя из требуемого номинального момента трения $M_{\text{т, nom}}$:

$$F_{\text{т0}} = M_{\text{т, nom}} / (k_{\text{тр}} \cdot R_{\text{cp}}), \quad (8.19)$$

где $R_{\text{cp}} = (D_1 + D_4)/4$ – средний радиус действия силы трения; $k_{\text{тр}}$ – коэффициент трения; D_1 и D_4 – наружный и внутренний диаметры магнитопровода.

Поскольку размеры ЭМТУ МП должны обеспечивать возможность их пристраивания к серийному электродвигателю, то при проектировании УЭ, как и в случае пружинных тормозов, размеры внешнего D_1 и внутреннего D_4 диаметров определяются с учетом выражения (7.10).

Полученные расчетные соотношения позволяют проектировать ЭМТУ МП с высокими технико-экономическими показателями, которые имеют в заданных габаритах максимально возможный фрикционный момент при гарантированной работоспособности с учетом разброса входных и собственных параметров. Это особенно важно, например, при использовании ЭМТУ МП в автономных сетях бортового оборудования, где указанные параметры могут колебаться в весьма широких диапазонах.

8.3. Методика и пример расчета электромеханических тормозных устройств с постоянными магнитами для электродвигателей

Как и при расчете пружинных ЭМТУ, для удобства практического использования предлагаемой методики, совместим ее с примером расчета тормоза с источником тормозного усилия в виде постоянных магнитов для конкретного заданного электродвигателя.

Выполним расчет ЭМТУ ПМ для АД, рассчитанного в главе 4.

Исходные данные:

- тормозной момент $M_t = 10,5 \text{ Нм}$, не менее;
- номинальное напряжение $U = 24 \text{ В}$;
- превышение температуры обмотки тормоза $\Delta t^0 = 80^\circ\text{C}$, не более;
- высота оси вращения электродвигателя $h = 80 \text{ мм}$.

Ограничения к условиям изготовления и эксплуатации:

- коэффициенты, учитывающие технологический разброс параметров постоянных магнитов $k_{n,max} = 1,15$; $k_{n,min} = 0,85$;
- коэффициенты колебаний напряжения $k_{U,max} = 1,1$; $k_{U,min} = 0,85$;
- коэффициент увеличения сопротивления вследствие нагрева $k_R = 1,3$;
- коэффициент заполнения паза $k_3 = 0,55$.

Константы:

- удельное сопротивление меди $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- коэффициент теплоотдачи $k_{to} = 16 \text{ Вт}/\text{м}^2\cdot\text{град.}$

Варьируемые параметры:

- магнитная индукция в стали полюсов $B_n = 0,75 \text{ Тл}$;
- магнитная индукция в постоянном магните $B_m = 0,3 \text{ Тл}$;
- плотность тока в обмотке $j = 7 \cdot 10^6 \text{ А}/\text{м}^2$;
- коэффициент трения $k_{tp} = 0,87$.

Дополнительные исходные данные определяются исходя из геометрических размеров АД, применяемых материалов и условий охлаждения, а также с учетом конструктивных особенностей тормозов данного типа.

8.3.1. Расчет активных частей тормоза с постоянными магнитами

Предварительный расчет заключается в выборе конструктивной компоновки тормоза и в ориентировочном определении размеров магнитопровода и постоянных магнитов, обмоточных данных управляющей обмотки, а также силы упругости возвратной пружины, способных обеспечить требуемые значения выходных параметров. Поскольку проектируемый двигатель предназначен для использования в приводах, требующих точного позиционирования рабочих органов, необходимо обеспечить отсутствие люфта вала в заторможенном состоянии. Для этого выбираем конструкцию тормозного диска в виде упругой мембранны, жестко закрепленной на валу электродвигателя при помощи цангового зажима.

Поскольку при сборке и ремонтно-профилактических работах возможен разрыв магнитной цепи постоянного магнита 1 (рис. 8.3), а также вследствие определенных технологических трудностей характера, не всегда позволяющих производить намагничивание постоянных магнитов при полностью собранной магнитной системе, целесообразно использовать металлокерамические ферритбариевые магниты, которые существенно не размагничиваются при изменении внешних условий [15]. Поэтому для проектируемого тормоза выбираем марку постоянного магнита – феррит бария 24 БА210.

При определении размеров постоянного магнита следует иметь в виду, что металлокерамические магниты имеют большую коэрцитивную силу H_c и малую остаточную индукцию B_r [15]. Поэтому увеличение толщины таких магнитов, т.е. их осевого размера, мало влияет на значения тормозного усилия. На основании анализа известных тормозов толщину магнита целесообразно выбирать в пределах $\Delta_M = 5\dots 6$ мм.

Фрикционная пара трения образована торцами наружного 2 и внутреннего 3 полюсов и якорем 4. Для уменьшения размагничивания постоянного магнита 1 при подключенной обмотке к питающему напряжению он частично зашунтирован дисковой частью 5 наружного полюса 2, которая выполняет функции дополнительного полюса.

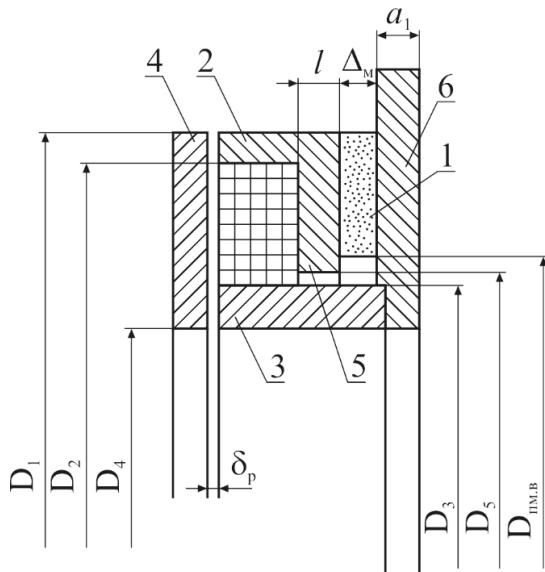


Рис. 8.3. Эскиз магнитной системы тормоза

Поскольку тормоз будет встраиваться в электродвигатель, то диаметральные размеры магнитопровода вычисляем с учетом размеров двигателя:

– диаметр D_1 вычисляем по высоте оси вращения $h_{\text{вр}}$ электродвигателя

$$D_1 = (1,3 \dots 1,5) h_{\text{вр}};$$

– диаметр D_4 выбираем с учетом наружного диаметра подшипникового узла $D_{\text{пу}}$ электродвигателя.

Воздушный зазор между якорем и полюсами при притянутом якоре зависит от шероховатости сопрягаемых поверхностей якоря и полюсов, а также от точности сборки тормоза. Его значение при расчете может быть принято $\delta_0 = 0,05 \dots 0,15$ мм. Воздушный зазор при разомкнутом фрикционном узле изменяется по мере износа

трущихся фрикционных поверхностей. Поэтому для обеспечения работоспособности на весь срок службы расчет следует вести по конечному допустимому значению зазора δ_p , равному $\delta_p = 1 \dots 2$ мм.

Воздушный зазор δ_d под добавочным полюсом 5 существенно влияет на все выходные показатели тормоза. Анализ показал, что воздушный зазор δ_d под добавочным полюсом необходимо выбирать с учетом величины рабочего воздушного зазора δ_p . Получено, что наиболее целесообразно выбирать δ_d на (30...50)% больше, чем начальный рабочий зазор $\delta_{p,\text{нач}}$.

Исходя из сказанного, для проектируемого тормоза принимаем:
– внешний и внутренний диаметры тормоза (рис. 8.3)

$$D_1 = 1,31 \cdot 80 = 0,105 \text{ м}; D_4 = 0,055 \text{ м};$$

- рабочий зазор $\delta_p = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м;
- зазор под добавочным полюсом $\delta_d = 2 \cdot 10^{-3}$ м;
- остаточный зазор при замкнутом тормозе $\delta_0 = 0,05 \cdot 10^{-3}$ м;
- толщина магнита $\Delta_M = 5,4 \cdot 10^{-3}$ м;

После выбора значений Δ_M , D_1 , D_4 , δ_0 , δ_p , δ_d предварительный расчет проводится в следующей последовательности.

1. Средний радиус торможения:

$$R_{cp} = \frac{D_1 + D_4}{4} = \frac{0,105 + 0,055}{4} = 40 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

2. Расчетное тормозное усилие:

$$F_{t0} = \frac{M_t}{k_{tp} \cdot R_{cp}} = \frac{10,5}{0,87 \cdot 40 \cdot 10^{-3}} = 345 \text{ H},$$

где k_{tp} – коэффициент трения (из исходных данных).

3. Сила упругости мембранны:

$$\begin{aligned}
 P'_{\text{пп}} &= \frac{k_{\text{зап}} \cdot F_{t0} \left(k_{n.\max} - k_{U.\min} / k_R \right)^2}{1 - \left(k_{n.\max} - k_{U.\min} / k_R \right)^2} = \\
 &= \frac{1,1 \cdot 345 \cdot (1,15 - 0,85 / 1,3)^2}{1 - (1,15 - 0,85 / 1,3)^2} = 124 \text{ H}; \\
 P''_{\text{пп}} &= \frac{k_{\text{зап}} \cdot F_{t0} \left(k_{U.\max} - k_{n.\min} \right)^2}{1 - \left(k_{U.\max} - k_{n.\min} \right)^2} = \frac{1,1 \cdot 345 (1,1 - 0,85)^2}{1 - (1,1 - 0,85)^2} = 25,3 \text{ H},
 \end{aligned}$$

где $k_{\text{зап}} = 1,05 \dots 1,1$ – расчетный коэффициент запаса тормозного усилия.

Принимаем $P_{\text{пп}} = 124 \text{ H}$.

4. Расчетное тяговое усилие постоянного магнита:

$$F_{\text{пм}} = F_{t0} + P_{\text{пп}} = 345 + 124 = 469 \text{ H}.$$

5. Площадь каждого из рабочих полюсов:

$$S_n = \mu_0 \cdot F_{\text{пм}} / B_n^2 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 469 / 0,75^2 = 1,05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

6. Внутренний диаметр внешнего полюса:

$$D_2 = \sqrt{D_1^2 - 4 \cdot S_n / \pi} = \sqrt{0,105^2 - 4 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} / \pi} = 0,1 \text{ м}.$$

7. Внешний диаметр внутреннего полюса:

$$D_3 = \sqrt{D_4^2 + 4 \cdot S_n / \pi} = \sqrt{0,055^2 + 4 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} / \pi} = 0,07 \text{ м}.$$

8. Внутренний диаметр добавочного полюса:

$$D_5 = D_3 + 2 \cdot \delta_d = 0,07 + 2 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 0,074 \text{ м}.$$

9. Площадь полюса постоянного магнита:

$$S_{\text{M}} = 1,5B_{\text{n}} \cdot S_{\text{n}} / B_{\text{M}} = 1,5 \cdot 0,75 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} / 0,3 = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

10. Внутренний диаметр постоянного магнита:

$$D_{\text{MB}} = \sqrt{D_1^2 - 4 \cdot S_{\text{M}} / \pi} = \sqrt{0,105^2 - 4 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} / \pi} = 0,088 \text{ м.}$$

11. Диаметр среднего витка обмотки:

$$D_{\text{cp}} = (D_2 + D_3) / 2 = (0,1 + 0,07) / 2 = 0,085 \text{ м.}$$

12. Ширина паза радиальная:

$$b = (D_2 - D_3) / 2 = (0,1 - 0,07) / 2 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

13. Число витков обмотки (предварительно):

$$W' = U / (j \cdot \rho \cdot \pi \cdot D_{\text{cp}}) = 24 / (7 \cdot 10^6 \cdot 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 0,085) = 730.$$

14. Намагничивающая сила обмотки:

$$F = \frac{B_{\text{n}} (2\delta_0 + \delta_{\text{d}})}{\sigma_{\text{po}} \cdot \mu_0} = \frac{0,75 (2 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3})}{2,2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 569,9 \text{ A.}$$

15. Ток обмотки (предварительно):

$$I' = F / W' = 569,9 / 730 = 0,78 \text{ A.}$$

16. Площадь сечения голого провода:

$$q' = I' / j = 0,78 / 7 \cdot 10^6 = 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

17. Диаметр голого провода (предварительно):

$$d' = \sqrt{4q' / \pi} = \sqrt{4 \cdot 0,11 \cdot 10^{-6} / \pi} = 0,374 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Выбираем ближайший диаметр стандартного провода $d_r = 0,375 \cdot 10^{-3}$ м.

18. Уточняем площадь сечения провода:

$$q = 4 \cdot d_r^2 / 4 = \pi(0,375 \cdot 10^{-3})^2 / 4 = 0,11 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

19. Уточняем число витков:

$$W = W' \left(d'_r / d_r \right)^2 = 730(0,374 / 0,375)^2 = 726 .$$

20. Сопротивление обмотки:

$$R = \rho \pi D_{cp} W / q = 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot 0,085 \cdot 726 / 0,11 \cdot 10^{-6} = 31 \text{ Ом.}$$

21. Уточняем ток в обмотке:

$$I = U / R = 24 / 31 = 0,77 \text{ А.}$$

22. Высота обмотки (осевая):

$$h_0 = W \cdot q / (b \cdot k_3) = 726 \cdot 0,11 \cdot 10^{-6} / (15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,55) = 9,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

23. Высота паза (осевая):

$$h = h_0 + 0,004 = (9,7 + 3)10^{-3} = 12,7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

24. Мощность обмотки:

$$P = UI = 24 \cdot 0,77 = 18,5 \text{ Вт.}$$

25. Превышение температуры обмотки:

$$\begin{aligned} \Delta t^0 &= P / [2\pi(h + b)D_{cp}k_{t0}] = \\ &= 8,5 / [2\pi(12,7 + 15)10^{-3} \cdot 0,085 \cdot 16] = 78,2^\circ\text{C} \end{aligned}$$

26. Толщина дополнительного полюса:

$$l = S_{\Pi} / (\pi \cdot D_5) = 1,05 \cdot 10^{-3} / (\pi \cdot 0,074) = 4,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

27. Размеры фланца

$$a_1 = S_{\Pi} / (\pi \cdot D_3) = 1,05 \cdot 10^{-3} / (\pi \cdot 0,07) = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

28. Высота якоря

$$h_{\text{я}} = S_{\Pi} / (\pi \cdot D_3) = 1,05 \cdot 10^{-3} / (\pi \cdot 0,07) = 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

8.3.2. Расчет выходных параметров тормоза

29. Для определения действительных рабочих точек постоянного магнита при различных положениях якоря вычислим магнитные проводимости на пути полезного потока и потоков рассеяния. Расчет сведем в табл. 8.1, где расчетные формулы соответствуют [15], а обозначения – рис. 8.4.

Таблица 8.1

Результаты расчета магнитных проводимостей

Обозначение	Расчетная формула	Численное значение, Гн·10 ⁻³
G_1	$\mu_0 l \frac{2\pi(D_3 / 2 + \delta_{\Delta} / 2)}{\delta_{\Delta}}$	6,39
G'_2	$\mu_0 \frac{2\pi D_3}{\pi} \ln\left(1 + \frac{2h}{\delta_{\Delta}}\right)$	2,3
G''_2	$\mu_0 3,3 (D_3 / 2 - 0,425 \delta_{\Delta})$	1,42
G_2	$G'_2 + G''_2$	3,72
G_3	$\mu_0 h \frac{2\pi(D_3 / 2 + b / 2)}{b}$	2,84
G_4	$2\mu_0 \ln\left(1 + \frac{D_1 - D_2}{b}\right) \cdot \frac{D_3 - D_4}{4}$	0,027
G_5	$\mu_0 3,26 D_5 / 2$	1,42
G_6	$\mu_0 2 D_1 \ln(1 + a_2 / \Delta_M)$	2,76
G_7	$\mu_0 3,26 D_1 / 2$	2,15

Окончание табл. 8.1

Обозначение	Расчетная формула	Численное значение, Гн·10 ⁻³
G_8	$\mu_0 D_1 \ln(1 + 2 h_a / \delta_p)$	2,7
G_9	$\mu_0 0,408 (2 D_1 + \delta_p)$	1,08
G_{10}	$\mu_0 \pi (D_1^2 - D_2^2) / (4 \cdot \delta_p)$	6,74
G_{11}	$\mu_0 3,26 D_2 / 2$	2,05
G_{12}	$4\mu_0 \left(\frac{D_2}{2} \cdot \ln \frac{h}{3\delta_p} - \frac{h}{3} + \delta_p \right)$	2,6
G_{13}	$\mu_0 2 D_3 \ln(1 + h / \delta_p)$	3,95
G_{14}	$\mu_0 3,26 D_3 / 2$	1,43
G_{15}	$\mu_0 \pi (D_3^2 - D_4^2) / (4 \cdot \delta_p)$	12,32
G_{16}	$\mu_0 0,408 (2 D_4 + \delta_p)$	0,57
G_{17}	$\mu_0 D_4 \ln(1 + 2 h_a / \delta_p)$	1,4

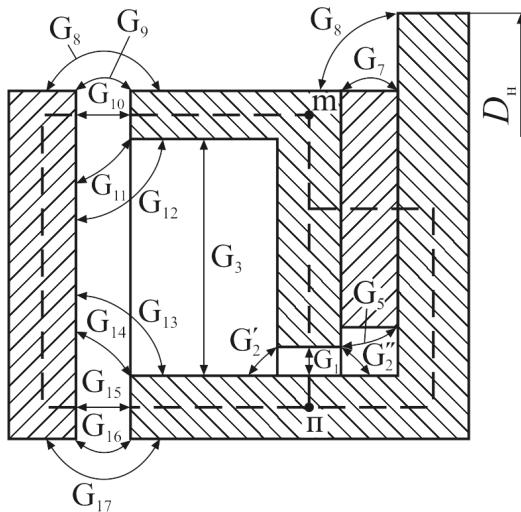


Рис. 8.4. Схема путей замыкания магнитного потока постоянного магнита

30. Общая проводимость при отсутствии якоря:

$$G_{\text{об}} = \sum_{i=1}^7 G_i = \\ = (6,39 + 3,72 + 2,84 + 0,027 + 1,42 + 2,76 + 2,15) \cdot 10^{-7} = \\ = 19,3 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.}$$

Отметим, что через G_4 обозначена проводимость между торцами внешнего и внутреннего полюсов при отсутствии якоря.

31. Приведенная проводимость при отсутствии якоря:

$$G_{\text{пр}} = G_{\text{o6}} \Delta_M / S_M = 19,3 \cdot 10^{-7} \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} / 2,6 \cdot 10^{-3} = 20 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.}$$

32. На графике кривой размагничивания постоянного магнита из начала координат проводимую прямую (рис. 8.5) под углом α_1 :

$$\alpha_1 = \arctg(G_{\text{пр}} \cdot m) = \arctg(20 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^5) = 58^\circ,$$

где $m = m_H / m_B = 8 \cdot 10^5 \text{ Гн}^{-1}$ – коэффициент пропорциональности между масштабами напряженности m_H и индукции m_B .

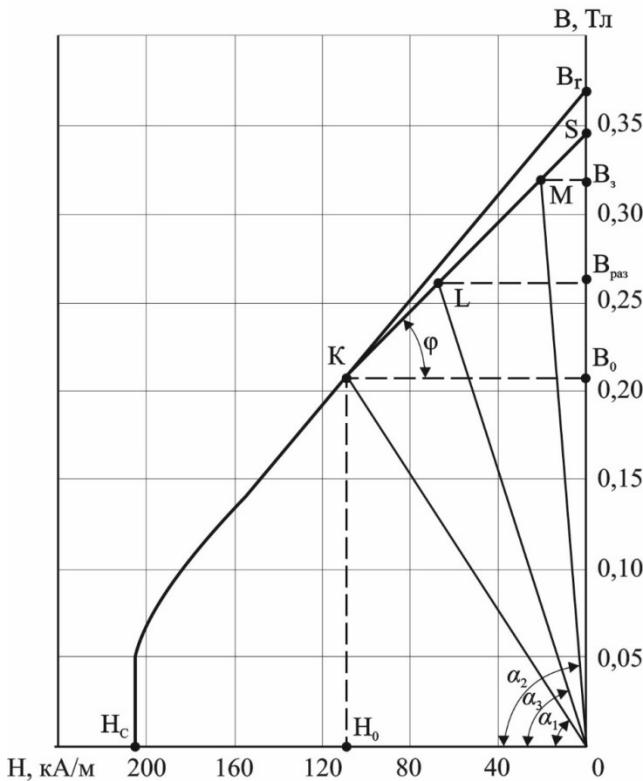


Рис. 8.5. Определение рабочих точек постоянного магнита

На рисунке 8.5 принято

$$m_H = 1,6 \cdot 10^3 \text{ (A/m) /мм; } m_B = 0,2 \cdot 10^{-2} \text{ Тл /мм.}$$

Точка пересечения K указанной прямой линии с кривой размагничивания дает значение индукции и напряженности магнитного поля в нейтральном сечении магнита при отсутствии якоря:

$$B_0 = 0,208 \text{ Тл; } H_0 = 110,4 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

33. Находим наклон прямой возврата KS :

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left[\frac{B_r}{H_c} (1 - K)^m \right] = \operatorname{arctg} \left[\frac{0,37}{205 \cdot 10^3} (1 - 0,33)^{6,4 \cdot 10^5} \right] = 44^\circ,$$

где

$$K = 2 \sqrt{\frac{B_r H_c}{B_0 H_0}} - \frac{B_r H_c}{B_0 H_0} = 2 \sqrt{\frac{0,37 \cdot 205 \cdot 10^3}{23 \cdot 10^3}} - \frac{0,37 \cdot 205 \cdot 10^3}{23 \cdot 10^3} = 0,33;$$

B_r – остаточная индукция; H_c – коэрцитивная сила.

34. Проводимость остаточного зазора δ_0 :

$$G_0 = \mu_0 S_{\text{n}} / (2\delta_0) = \\ = 4 \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,1 \cdot 10^{-3} / (2 \cdot 0,05 \cdot 10^{-3}) = 131,88 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.}$$

35. Общая проводимость при притянутом к полюсам якоре:

$$G_{\text{o6.3}} = G_{\text{o6}} + G_0 - G_4 - G_3 = \\ = (19,3 + 131,88 - 0,027 - 2,84) \cdot 10^{-7} = 148,31 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$$

36. На графике кривой размагничивания (рис.8.5) из начала координат проводим прямую под углом α_2 :

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg}(G_{\text{np.3}} \cdot m) = \operatorname{arctg}(154 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^5) = 85^\circ,$$

где $G_{\text{np.3}} = G_{\text{o6.3}} \Delta_{\text{M}} / S_{\text{M}} = 148,31 \cdot 10^{-7} \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} / 2,6 \cdot 10^{-3} = 154 \cdot 10^{-7} \text{ Гн}$ – приведенное значение проводимости при замкнутом тормозе.

Точка пересечения этой линии с прямой возврата дает значение индукции и напряженности магнитного поля в нейтральном сечении ПМ при замкнутом тормозе:

$$B_3 = 0,328 \text{ Тл}; H_3 = 22,4 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

37. Общая проводимость внешнего полюса:

$$\begin{aligned} G_{\text{вн}} &= \sum_{i=8}^{12} G_i = \\ &= (2,7 + 1,08 + 6,74 + 2,05 + 2,6) \cdot 10^{-7} = 15,17 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \end{aligned}$$

38. Общая проводимость внутреннего полюса:

$$\begin{aligned} G_{\text{в}} &= \sum_{i=13}^{17} G_i = \\ &= (3,95 + 1,43 + 12,32 + 0,57 + 1,4) \cdot 10^{-7} = 19,1 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \end{aligned}$$

39. Общая проводимость при разомкнутом тормозе:

$$\begin{aligned} G_{\text{об.раз}} &= G_{\text{об.3}} - G_0 + \frac{G_{\text{вн}} \cdot G_{\text{в}}}{G_{\text{вн}} + G_{\text{в}}} = \\ &= \left(148,31 - 131,88 + \frac{15,17 \cdot 19,1}{15,17 + 19,1} \right) \cdot 10^{-7} = 24,88 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \end{aligned}$$

40. Приведенное значение общей проводимости при разомкнутом тормозе:

$$\begin{aligned} G_{\text{пр.раз}} &= G_{\text{об.раз}} \Delta_M / S_M = \\ &= 24,88 \cdot 10^{-7} \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} / 2,6 \cdot 10^{-3} = 25,8 \cdot 10^{-7} \text{ Гн.} \end{aligned}$$

41. Проводим прямую линию OL под углом α_3 (рис. 8.5):

$$\alpha_3 = \arctg(G_{\text{пр.раз}} \cdot m) = \arctg(25,8 \cdot 10^{-7} \cdot 8 \cdot 10^5) = 64^\circ.$$

Точка пересечения этой прямой линии с прямой возврата дает значение индукции и напряженности при разомкнутом тормозе:

$$B_{\text{pas}} = 0,226 \text{ Тл}; H_{\text{pas}} = 97,6 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

42. Индукция в рабочем зазоре при разомкнутом тормозе:

$$B'_{\text{pas}} = (B_{\text{pas}} / \sigma_p) \cdot (S_m / S_n) = (0,228 / 5,71) \cdot (2,6 / 1,05) = 0,1 \text{ Тл},$$

$$\text{где } \sigma_p = \frac{G_{\text{об,пас}} (G_{\text{вн}} + G_b)}{G_{\text{вн}} \cdot G_b} = \frac{24,88(6,74 + 12,32)}{6,74 \cdot 12,32} = 5,71.$$

43. Индукция в рабочем зазоре при замкнутом тормозе:

$$B'_3 = (B_3 / \sigma_3) \cdot (S_m / S_n) = (0,328 / 1,124) \cdot (2,6 / 1,05) = 0,72 \text{ Тл},$$

$$\text{где } \sigma_3 = G_{\text{об,3}} / G_0 = 148,31 / 131,88 = 1,124.$$

44. Тяговое усилие, действующее на якорь при разомкнутом тормозе (при $\delta = \delta_p$):

$$F_{t,p} = B'^2_{\text{pas}} \cdot S_n / \mu_0 = 0,1^2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} / (4\pi 10^{-7}) = 8,3 \text{ Н.}$$

45. Тяговое усилие, действующее на якорь при замкнутом тормозе (при $\delta = \delta_0$):

$$F_{t,3} = B'^2_3 \cdot S_n / \mu_0 = 0,72^2 \cdot 1,05 \cdot 10^{-3} / (4\pi 10^{-7}) = 433,4 \text{ Н.}$$

46. Тормозной момент:

$$M_t = k_{tp} R_{cp} (F_{t,3} - P_{np}) = 0,87 \cdot 0,04(433,4 - 124) = 10,7 \text{ Н}\cdot\text{м.}$$

Таким образом, при отключении обмотки тяговое усилие, действующее на якорь со стороны магнитного поля постоянного магнита, станет равным $F_{t,p} = 8,3 \text{ Н}$ (см. п.16), что больше силы упругости мембранны. За счет этого усилия тормоз замкнется.

За счет уменьшения воздушного зазора между якорем и магнитопроводом тяговое усилие увеличится до $F_{\text{т.з}} = 433,4 \text{ Н}$ и на валу будет создаваться тормозной момент $M_{\text{т}} = 10,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$, что удовлетворяет исходным данным.

8.3.3. Разработка конструкции электромеханического тормозного устройства

На рисунке 8.6 приведена конструкция разработанного ЭМТУ ПМ в обесточенном состоянии, при котором фрикционный узел замкнут и вал электродвигателя заторможен.

Растормаживающий электромагнит постоянного тока содержит обмотку 1, дисковый якорь 2, установленный с возможностью осевых перемещений, и составной магнитопровод из наружного 3 и внутреннего 4 полюсов и фланца 5. В магнитопровод встроен постоянный магнит 6. Фрикционный узел образован якорем 2 и торцевыми поверхностями обоих полюсов. Якорь закреплен на упругой мемbrane 7, жестко зафиксированной на валу электродвигателя при помощи цангового зажима. Последний представляет собой цангу 8 и конусную втулку 9, у которых поверхности сопряжения выполнены конусными. Цанга выполнена в виде пружинящей разрезной втулки с усеченным конусом и сквозным отверстием необходимого диаметра, соответствующим диаметру вала электродвигателя. При затягивании натяжных винтов 10 втулка 9 натягивается на цангу 8, упругие лепестки которой сжимают вал. Это обеспечивает отсутствие люфта вала в заторможенном состоянии. Якорь 2 закрепляется на мемbrane 7 при помощи заклепок 11 и кольца 12, а мембрана 7 крепится к цилиндрической части цанги 8 заклепками 13. Магнитная система тормоза прикрепляется к фланцу 5 винтами 14. Фланец 5 одновременно служит для крепления тормоза к подшипниковому щиту двигателя.

При отсутствии тока в обмотке растормаживающего электромагнита магнитный поток $\Phi_{\text{пм}}$ постоянного магнита 6 замыкается по якорю 2 (рис. 8.6) и притягивает его к полюсам. За счет этого во

фрикционной паре создается тормозное усилие и вал электродвигателя заторможен. При этом преодолевается незначительное усилие упругой мембранны 7, которая прогибается в сторону магнитопровода. Поскольку мембрана закреплена на валу электродвигателя при помощи цангового зажима, то вал электродвигателя в этом состоянии электромагнита заторможен. Поскольку тормозных накладок между якорем и полюсами нет, то для исключения перехода трения в режим «заедания» эти элементы пары трения следует выполнять из несовпадающих марок стали. В тормозах, требующих большой срок службы по числу аварийных торможений, для увеличения износстойкость пары трения на полюсах магнитопровода можно устанавливать накладки из перлитового чугуна.

Размыкание фрикционного узла осуществляется путем подачи напряжения на обмотку 1 электромагнита, которая создает магнитный поток $\Phi_{\text{эм}}$, равный по величине и направленный встречно потоку Φ_{pm} постоянного магнита. За счет этого магнитный поток $\Phi_{\text{эм}}$ вытесняет магнитный поток Φ_{pm} из якоря 2 и прилегающих к нему участков полюсов и Φ_{pm} начинает замыкаться по дополнительному полюсу 3* через воздушный зазор δ_d (рис. 8.6). Тем самым тяговое усилие, действующее на якорь со стороны постоянного магнита, исчезает и мембрана 7 выпрямляется. Между якорем и магнитопроводом появляется зазор δ_p и вал растормаживается. Величина зазора δ_p выставляется при сборке тормоза путем выбора места крепления цангового зажима на валу.

Таким образом, тормоз представляет собой нормально замкнутое механическое фрикционное устройство с электромагнитным приводом для растормаживания. Схема управления этого привода обеспечивает размыкание тормоза при включении электродвигателя. При отключении электродвигателя одновременно снижается напряжение с обмотки электромагнита, тормоз замыкается и вал электродвигателя затормаживается.

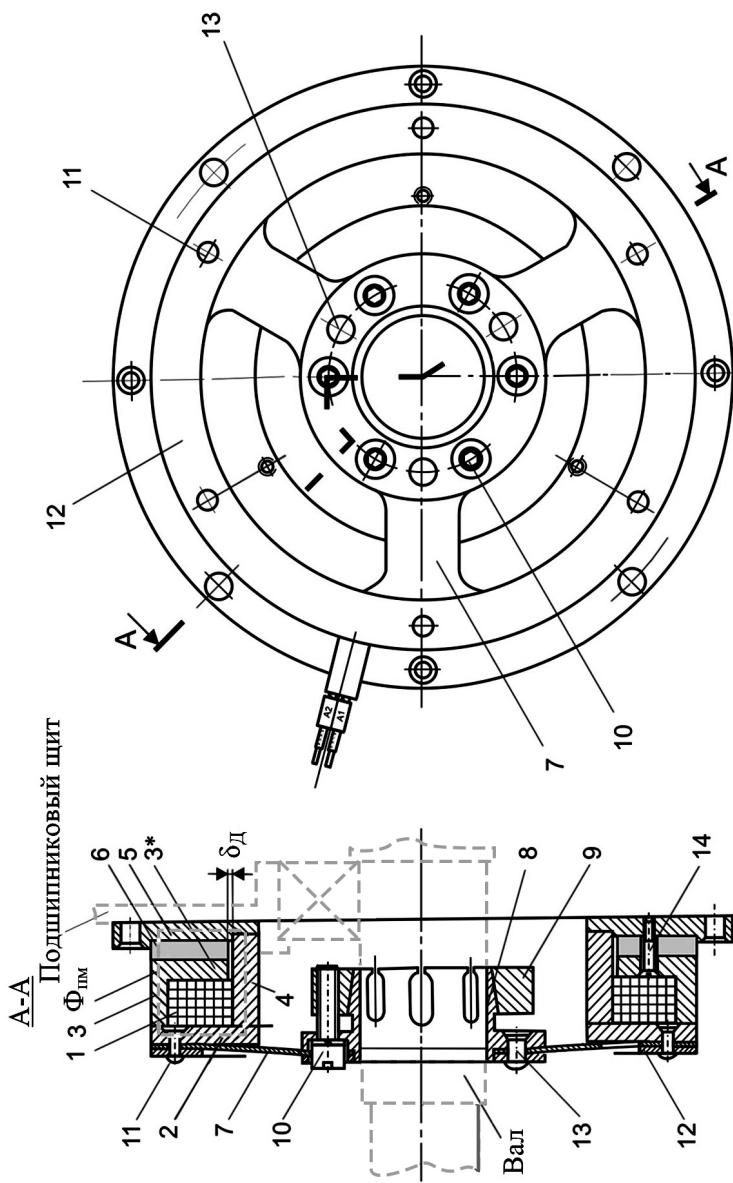


Рис. 8.6. Конструкция однодискового ЭМТУ ПМ (обмотка обесточена, фрикционный узел замкнут)

Преимущество предложенной конструкции по сравнению с известными ЭМТУ ПМ, у которых магнитная цепь является последовательной, состоит в том, что она имеет дополнительный полюс, роль которого выполняет дисковая часть 3* наружного полюса 3. За счет этого магнитная цепь получается разветвленной и магнитный поток $\Phi_{\text{эм}}$ не размагничивает ПМ, а просто изменяет путь замыкания потока $\Phi_{\text{пм}}$. Это позволяет повысить быстродействие тормоза и уменьшить размеры ПМ.

Вопросы и задания для самопроверки

1. Какими преимуществами обладают ЭМТУ с постоянными магнитами?
2. Опишите конструкции ЭМТУ ПМ.
3. В чем заключаются особенности работы пружинных фрикционных тормозов и тормозов с постоянными магнитами?
4. Как конструктивным путем можно обеспечить отсутствие люфта вала АД в заторможенном состоянии ЭМТУ ПМ?
5. Какие существуют конструктивные ограничения при проектировании ЭМТУ ПМ для АД?
6. Как определяют действительные рабочие точки постоянного магнита при различных положениях якоря растормаживающего электромагнита?
7. Как проводится расчет тяговых усилий, развиваемых растормаживающим электромагнитом при различных положениях якоря?
8. Как проводится расчет выходных параметров ЭМТУ ПМ?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Назначение настоящего учебного пособия состоит в том, чтобы ознакомить студентов с методами проектирования асинхронных машин, научить применять приобретенные теоретические знания для решения конкретных инженерных задач и привить навыки самостоятельной расчетно-конструкторской работы. Данное учебное пособие не ставило своей целью детально осветить все тонкости и особенности проектирования асинхронных машин различных типов. Для этой цели существует большое количество различной специальной литературы. Здесь даны рекомендации только по основным вопросам проектирования асинхронных электродвигателей основных исполнений и их конструктивных модификаций. Это позволяет правильно сориентироваться в известной литературе по асинхронным машинам, представить объем и последовательность проектирования и целенаправленно работать над выполнением проекта. Такое построение материала прививает навыки самостоятельной работы с литературными первоисточниками: учебной и справочной литературой, ГОСТами, каталогами и т.п.

Расчет асинхронных электродвигателей, как и других электрических машин, в проектных организациях производится обычно с применением компьютерной техники. При этом широко применяются разработанные программы полного расчета машины с использованием математического моделирования протекающих в машине электромагнитных процессов. Однако такие программы, в которых роль проектанта, в сущности, практически ограничена лишь заданием исходных данных и ограничений, не позволяют понять сложные многофакторные взаимные влияния геометрии машины и электромагнитных свойств примененных в ней активных материалов на выходные параметры и характеристики машины. Поэтому при освоении принципов проектирования АД большую часть расчетов целесообразно выполнять вручную. Однако некоторые разделы расчета предполагают выполнение повторяющихся вычислений по одним и тем же формулам

при определенном изменении начальных данных (например, расчет точек одной характеристики). Такие вычисления, требуя значительного времени на их выполнение, загромождают расчет и отвлекают внимание от логической последовательности расчета. Поэтому их целесообразно выполнять с помощью соответствующих программ расчета с использованием вычислительной техники. При этом, тем не менее, необходимо вручную выполнить расчет характерных точек. Например, при расчете рабочих характеристик вручную выполняется расчет точки, близкой к номинальной, при расчете пусковых характеристик – расчет кратностей пускового момента и пускового тока.

Основное функциональное назначение АД, как и любой другой силовой электрической машины, – это электромеханическое преобразование энергии. Однако этот процесс сопровождается потерями (электрическими, магнитными, механическими) и часть преобразуемой энергии превращается в тепловую. Тепловая энергия потеря нагревает АД и передается окружающей среде, где рассеивается и безвозвратно теряется. Очевидно, что от интенсивности отвода выделяющихся тепловых потерь зависит нагрев и, соответственно, работоспособность машины. Таким образом, спроектировать нормально работающую электрическую машину невозможно не только без точного расчета протекающих в ней процессов электромеханического преобразования энергии, но и без тепловых и аэродинамических расчетов, базирующихся на законах термо- и аэродинамики.

В инженерной практике для расчета перечисленных процессов, имеющих совершенно разную физическую природу, используется единый подход. Он заключается в том, что реальные процессы заменяются эквивалентной электрической схемой замещения (ЭСЗ), которая, в сущности, заменяет эти процессы на идеализированные, что упрощает процесс расчёта. Для составления таких ЭСЗ соответствующие реальные процессы, протекающие в машине и имеющие непрерывно распределенные параметры внутри ее объема, заменяют эквивалентной электрической схемой

с сосредоточенными параметрами ее элементов. Таким образом получают ЭСЗ, которая имитирует процессы, происходящие в машине. И действительно, как следует из приведенных выше методик, видно, что:

- расчет процессов электромеханического преобразования энергии в АД при определении рабочих и пусковых характеристик производится с помощью эквивалентной Т-образной (рис. 3.6) или Г-образной (рис. 3.8) *электрических схем замещения*;
- вентиляционный расчет выполняется с использованием эквивалентной *аэродинамической схемы замещения* (рис. 3.10);
- тепловой расчет производится с помощью эквивалентной *тепловой схемы замещения* (рис. 6.1).

Принципы построения электрических схем замещения подробно описаны в соответствующей литературе, например, в [16,17], а принципы построения аэродинамической и тепловой ЭСЗ приведены в настоящем учебном пособии в разделах 3.4.1 и 6.5. Очевидно, что точность расчета однозначно определяется корректностью построения топологии ЭСЗ и достоверностью численных значений всех входящих в нее элементов.

Поскольку АД – это еще и система, испытывающая различные механические нагрузки, то неотъемлемой частью их проектирования являются соответствующие механические расчеты. При этом на начальном этапе знакомства с проектированием АД расчет выполняется только для наиболее нагруженных элементов – для вала и подшипников. В разделах 3.4.3, 3.5 и 3.6 приведены упрощенные методики конструирования и расчета указанных элементов АД. Более подробную информацию можно найти в [18,19].

В заключение отметим, что использование полной программы автоматизированного оптимизационного проектирования электродвигателя является очень важной практической задачей. Однако прежде чем заниматься этими вопросами, необходимо научиться основным принципам расчета и конструирования машины. Именно эти вопросы и рассмотрены в данном пособии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование электрических машин: учебник / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин и др.; под ред. И.П. Копылова – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2020.
2. Гольдберг, О.Д. Инженерное проектирование электрических машин: учебник / О.Д. Гольдберг, Л.Н. Макаров, С.П. Хелемская. – М.: Бастет, 2016.
3. Беспалов, А.В. Проектирование асинхронного двигателя общего назначения с короткозамкнутым ротором: учеб. пособие / А.В. Беспалов. – Нижневартовск: Изд-во НГУ, 2012.
4. Шевченко А. Ф., Шевченко Л. Г. Проектирование асинхронных двигателей. – Новосибирск: НГТУ, 2020.
5. Хитров, А.И. Общепромышленные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором / А.И. Хитров, А.А. Хитров. – М.: Инфра-Инженерия, 2024.
6. Кацман, М.М. Справочник по электрическим машинам / М.М. Кацман. – М.: Издательский центр «Академия», 2005.
7. Доманов, В.И. Тепловые расчеты узлов электропривода: учеб. пособие / В.И. Доманов, А.В. Сердцева. – Ульяновск: УлГТУ, 2019
8. Брандина, Е.П. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах / Е.П. Брандина, О.В. Шелудько. – Л.: СЗПИ, 1991.
9. Честюнина, Т.В. Вентиляционные и тепловые расчеты электрических машин в примерах и задачах / Т.В. Честюнина, В. Тюков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016.
10. Грачев, И.Г. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / И.Г. Грачев, С.Ю. Пирогов, Н.П. Савищенко и др.: под ред. А. С. Юрьева. – С.-Петербург: АНО НПО «Мир и семья», 2006.
11. Лопухина, Е.М. Автоматизированное проектирование электрических машин малой мощности / Е.М. Лопухина, Г.А. Семенчуков. – М.: Высшая школа, 2002.

12. Тормозные устройства: справочник / М.П. Александров, А.Г. Лысяков, В.Н. Федосеев и др.: под общ. ред. М.П. Александрова – М.: Машиностроение, 1985.
13. Бочкирев, И.В. Быстродействующие электромеханические тормозные устройства для электродвигателей / И.В. Бочкирев. – М.: Энергоатомиздат, 2001.
14. Поляков, П.А. Теория и методы проектирования фрикционных узлов тормозных механизмов транспортных машин: учеб. пособие / П.А. Поляков, Е.С. Федотов. – Краснодар: КГТУ, 2020.
15. Пискорский, В.П. Физика и инженерия постоянных магнитов / В.П. Пискорский, Д.В. Королев, Р.А. Валеев и др. ВИАМ, 2018.
16. Беспалов, В.Я. Электрические машины / В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец. – М.: Академия, 2018.
17. Копылов, И.П. Электрические машины / И.П. Копылов. – М.: Издательство Юрайт, 2024.
18. Митюров, А.А. Проектирование и расчет валов и установленных на них деталей и узлов / А.А. Митюров, О.В. Дорогов. – М.: Инфра-Инженерия, 2024.
19. Дунаев, П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – М.: Академия, 2004.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П.1

Диаметр и площади поперечного сечения круглых медных эмалированных проводов марок ПЭТВ и ПЭТ-155

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²
0,08	0,10	0,00502
0,09	0,11	0,00636
0,10	0,122	0,00785
0,112	0,134	0,00985
0,125	0,147	0,01227
(0,132)	0,154	0,01368
0,14	0,162	0,01539
0,15	0,18	0,01767
0,16	0,19	0,0201
0,17	0,20	0,0227
0,18	0,21	0,0255
(0,19)	0,22	0,0284
0,20	0,23	0,0314
(0,212)	0,242	0,0353
0,224	0,259	0,0394
(0,236)	0,271	0,0437
0,25	0,285	0,0491
(0,265)	0,300	0,0552
0,28	0,315	0,0616
(0,30)	0,335	0,0707
0,315	0,350	0,0779
0,335	0,370	0,0881
0,355	0,395	0,099
0,375	0,415	0,1104
0,40	0,44	0,1257
0,425	0,465	0,1419
0,45	0,49	0,1590
(0,475)	0,515	0,1772
0,50	0,545	0,1963

Окончание табл. П.1

Номинальный диаметр неизолированного провода, мм	Среднее значение диаметра изолированного провода, мм	Площадь поперечного сечения неизолированного провода, мм ²
(0,53)	0,585	0,221
0,56	0,615	0,246
0,60	0,655	0,283
0,62	0,675	0,302
0,63	0,69	0,312
(0,67)	0,73	0,353
0,71	0,77	0,396
0,75	0,815	0,442
0,80	0,865	0,503
0,85	0,915	0,567
0,90	0,965	0,636
0,95	1,015	0,709
1,00	1,08	0,785
1,06	1,14	0,883
1,12	1,20	0,985
1,18	1,26	1,094
1,25	1,33	1,227
1,32	1,405	1,368
1,40	1,485	1,539
1,50	1,585	1,767
1,60	1,685	2,011
1,70	1,785	2,27
1,80	1,895	2,54
1,90	1,995	2,83
2,00	2,095	3,14
2,12	2,22	3,53
2,24	2,34	3,94
2,36	2,46	4,36
2,50	2,60	4,91

Примечание: 1. Провода, размеры которых указаны в скобках, следует применять только в отдельных случаях при обосновании технико-экономической целесообразности.

2. Среднее значение диаметра изолированного провода вычислено с учетом расчетной средней двусторонней толщины эмалевой изоляции, принимаемой как округленное среднее арифметическое из минимальной и максимальной толщины.

Таблица П.2

**Кривые намагничивания
электротехнической стали марки 2013**

Для зубцов асинхронного двигателя

<i>B, Тл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,4	124	127	130	133	136	138	141	144	147	150
0,5	154	157	160	164	167	171	174	177	180	184
0,6	188	191	194	198	201	205	208	212	216	220
0,7	223	226	229	233	236	240	243	247	250	253
0,8	256	259	262	265	268	271	274	277	280	283
0,9	286	290	293	297	301	304	308	312	316	320
1,0	324	329	333	338	342	346	350	355	360	365
1,1	370	375	380	385	391	396	401	406	411	417
1,2	424	430	436	442	448	455	461	467	473	479
1,3	486	495	504	514	524	533	563	574	584	585
1,4	586	598	610	622	634	646	658	670	683	696
1,5	709	722	735	749	763	777	791	805	820	835
1,6	850	878	906	934	962	990	1020	1050	1080	1110
1,7	1150	1180	1220	1250	1290	1330	1360	1400	1440	1480
1,8	1520	1570	1620	1670	1720	1770	1830	1890	1950	2010
1,9	2070	2160	2250	2340	2430	2520	2640	2760	2890	3020
2,0	3150	3320	3500	3680	3860	4040	4260	4480	4700	4920
2,1	5140	5440	5740	6050	6360	6670	7120	7570	8020	8470
2,2	8920	9430	9940	10460	10980	11500	12000	12600	13200	13800
2,3	14400	15100	15800	16500	17200	18000	18800	19600	20500	21400

Для ярма асинхронного двигателя

<i>B, Тл</i>	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H, А/м</i>									
0,4	52	53	54	55	56	58	59	60	61	62
0,5	64	65	66	67	69	71	72	74	76	78
0,6	80	81	83	85	87	89	91	93	95	97
0,7	100	102	104	106	108	111	113	115	118	121
0,8	124	126	129	132	135	138	140	143	146	149
0,9	152	155	158	161	164	168	171	174	177	181
1,0	185	188	191	195	199	203	206	209	213	217
1,1	221	225	229	233	237	241	245	249	253	257
1,2	262	267	272	277	283	289	295	301	307	313
1,3	320	327	334	341	349	357	365	373	382	391
1,4	400	410	420	430	440	450	464	478	492	506
1,5	520	542	564	586	608	630	654	678	702	726
1,6	750	788	826	864	902	940	982	1020	1070	1110
1,7	1150	1220	1290	1360	1430	1500	1600	1700	1800	1900
1,8	2000	2160	2320	2490	2650	2810	2960	3110	3270	3420
1,9	3570	3800	4030	4260	4490	4720	4930	5140	5350	5560
2,0	5770	6000	6300	6600	7000	7400	7900	8400	9000	9700

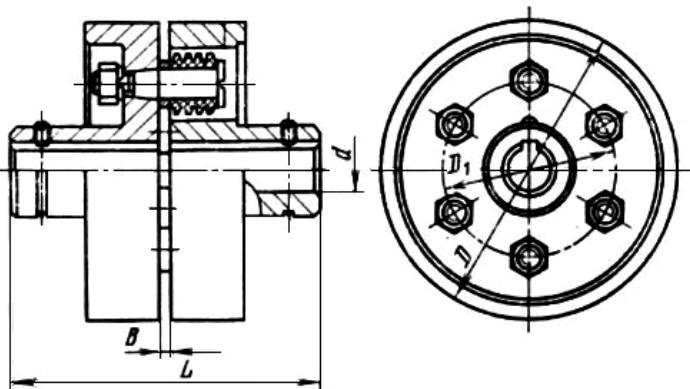
Таблица П.3

Кривая намагничивания конструкционной стали марки 10

<i>B</i> , Тл	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
	<i>H</i> , А/м									
0	0	30	50	70	85	100	105	115	120	125
0,1	130	135	140	145	150	155	160	162	165	168
0,2	170	175	177	180	182	185	188	190	192	195
0,3	197	199	200	202	204	206	208	210	213	215
0,4	218	220	222	228	230	235	237	240	245	248
0,5	250	255	258	260	265	270	274	277	282	285
0,6	290	295	300	305	308	312	318	322	325	335
0,7	338	345	348	355	360	365	373	380	385	390
0,8	400	405	413	420	427	435	442	450	458	465
0,9	472	480	490	500	510	520	530	540	550	560
1,0	570	580	590	600	610	620	630	645	660	670
1,1	682	695	705	720	735	750	765	775	785	800
1,2	810	825	842	855	870	885	900	920	935	955
1,3	975	990	1000	1080	1140	1200	1270	1360	14400	1520
1,4	1590	1660	1760	1840	1920	2000	2120	2200	23200	2420
1,5	2520	2620	2740	2840	2920	3020	3140	3270	33200	3400
1,6	3520	3620	3720	3840	3940	4040	4140	4280	44200	4600
1,7	4760	5800	6000	6200	6400	6600	6900	7200	76000	8000
1,8	8300	8500	9000	9300	9700	10000	10300	10800	11000	11400
1,9	12000	12400	13000	13300	13700	14000	14500	15200	15800	16500
2,0	17000	17700	18300	18800	19400	20000	20500	21200	22000	22500
2,1	23000	24000	25000	25700	26400	27300	28200	29000	30000	30800
2,2	32000	32800	33800	35000	36200	37000	38200	39200	40500	41500
2,3	42500	43500	44500	45800	47000	48200	50000	52000	55000	59000

Таблица П.4

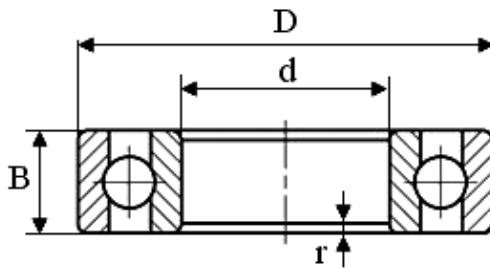
**Размеры, масса, динамический момент инерции
и наибольший крутящий момент
для упругих втулочных пальцевых муфт**



Условное обозначение муфты	Размеры, мм							$J_{\text{кру}}$, мм	Крутящий момент, Н·м	Частота вращения, об/мин	Масса, кг
	d	D	L	D_1	B	Число кулачков, шт.					
МУВП 6,3-10	10	71	43	45	3	3	18	6,3	8820	0,6	
МУВП 16-14	14	75	63	50	3	4	18	16	7620	0,68	
МУВП 16-16	16	75	63	50	3	4	18	16	7620	0,75	
МУВП 31,5-18	18	90	84	62	4	4	25	31,5	6360	1,4	
МУВП 63-20	20	100	104	72	4	6	25	63	5700	2,02	
МУВП 63-22	22	100	104	68	4	6	25	63	5700	2,14	
МУВП 127-28	28	120	125	84	5	4	45	127	4750	4,40	
МУВП 235-32	32	140	165	100	5	6	45	235	4000	7,33	
МУВП 235-38	38	140	165	100	5	6	45	235	4000	6,97	
МУВП 440-42	42	170	226	120	6	8	60	440	3350	13,27	
МУВП 449-45	45	170	226	120	6	8	60	440	3350	12,93	

Таблица П.5

**Шарикоподшипники радиальные однорядные
(ГОСТ 8338-2022)**



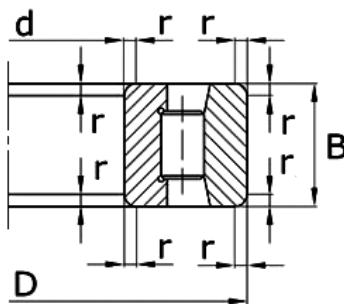
Условное обозначение подшипника	d , мм	D , мм	B , мм	r , мм	C , Н	C_0 , Н	n , об/мин
<i>Легкая серия</i>							
202	15	35	11	1,0	5850	3470	16000
203	17	40	12	1,0	7400	4400	16000
204	20	47	14	1,5	9800	6200	12500
205	25	52	15	1,5	10800	6950	10000
206	30	62	16	1,5	15000	10000	10000
207	35	72	17	2,0	19700	13600	8000
208	40	80	18	2,0	25100	17800	6300
209	45	85	19	2,0	25200	17800	6300
210	50	90	20	2,0	27000	19800	6300
211	55	100	21	2,5	33400	25100	5000
212	60	110	22	2,5	40400	30900	5000
213	65	120	23	2,5	44000	34000	5000
214	70	125	24	2,5	48000	37400	4000
215	75	130	25	2,5	51000	41000	4000
216	80	140	26	3,0	56000	44500	4000
217	85	150	28	3,0	64000	53100	4000
218	90	160	30	3,0	74000	60500	3150
219	95	170	32	3,5	84000	69500	3150
220	100	180	34	3,5	94000	79000	3150

Окончание табл. П.5

Условное обозначение подшипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C₀</i> , Н	<i>n</i> , об/мин
Средняя серия							
302	15	42	13	1,5	8750	5400	16000
303	17	47	14	1,5	10700	6670	12500
304	20	52	15	2,0	12250	7780	12500
305	25	62	17	2,0	17250	11400	10000
306	30	72	19	2,0	21600	14800	8000
307	35	80	21	2,5	25700	17550	8000
308	40	90	23	2,5	31300	22200	6300
309	45	100	25	2,5	37000	26200	6300
310	50	110	27	3,0	47500	35600	5000
311	55	120	29	3,0	55000	41800	5000
312	60	130	31	3,5	63000	48400	4000
313	65	140	33	3,5	71300	55600	4000
314	70	150	35	3,5	80200	63200	4000
315	75	160	37	3,5	87500	71500	3150
316	80	170	39	3,5	94600	80200	3150
317	85	180	41	4,0	102000	89400	3150
318	90	190	43	4,0	110000	99000	3150
319	95	200	45	4,0	117000	109000	2500
320	100	215	47	4,0	134000	130000	2500
Тяжелая серия							
403	17	62	17	2,0	22,9	11,8	12 000
405	25	80	21	2,5	36,4	20,4	9 000
406	30	90	23	2,5	47,0	26,7	8 500
407	35	100	25	2,5	55,3	31,0	7 000
408	40	110	27	3,0	63,7	36,5	6 700
409	45	120	29	3,0	76,1	45,5	6 000
410	50	130	31	3,5	87,1	52,0	5 300
411	55	140	33	3,5	100,0	63,0	5 000
412	60	150	35	3,5	108,0	70,0	4 800
413	65	160	37	3,5	119,0	78,0	4 500
414	70	180	42	4,0	143,0	105,0	3 800
416	80	200	48	4,0	163,0	125,0	3 400
417	85	210	52	5,0	174,0	135,0	3 200

Таблица П.6

**Роликоподшипники радиальные с короткими
цилиндрическими роликами (ГОСТ 8328-2022)**



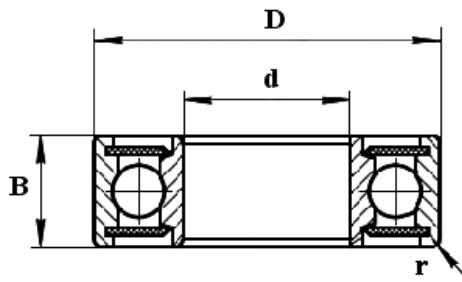
Условное обозначение подшипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C₀</i> , Н	<i>n</i> , об/мин
<i>Легкая узкая серия</i>							
2202	15	35	11	1,0	5520	3020	16000
2204	20	47	14	1,5	11700	7250	12500
2205	25	52	15	1,5	13200	8450	10000
2206	30	62	16	1,5	17000	11200	10000
2207	35	72	17	2,0	25000	17200	8000
2208	40	80	18	2,0	33000	23500	8000
2209	45	85	19	2,0	34300	25200	6300
2210	50	90	20	2,0	38000	28600	6300
2211	55	100	21	2,5	43000	32300	6300
2212	60	110	22	2,5	53700	42000	5000
2213	65	120	23	2,5	61000	47600	5000
2214	70	125	24	2,5	67500	47700	4000
2215	75	130	25	2,5	76500	60000	4000
2216	80	140	26	3,0	78000	62300	4000
2217	85	150	28	3,0	97000	80900	3150
2218	90	160	30	3,0	119000	99000	3150
2220	100	180	34	3,5	132500	109000	2500
<i>Средняя узкая серия</i>							
2305	25	62	17	2,0	22000	14500	8000
2306	30	72	19	2,0	29600	20200	8000
2307	35	80	21	2,5	33400	22800	6300

Окончание табл. П.6

Условное обозначение подшипника	<i>d</i> , мм	<i>D</i> , мм	<i>B</i> , мм	<i>r</i> , мм	<i>C</i> , Н	<i>C₀</i> , Н	<i>n</i> , об/мин
<i>Средняя узкая серия</i>							
2308	40	90	23	2,5	40200	28000	6300
2309	45	100	25	2,5	55500	40000	6300
2310	50	110	27	3,0	64000	46500	5000
2311	55	120	29	3,0	82500	61500	5000
2312	60	130	31	3,5	98000	75800	4000
2313	65	140	33	3,5	103000	78800	4000
2314	70	160	35	3,5	121000	95500	4000
2315	75	160	37	3,5	139000	110000	3150
2316	80	170	39	3,5	147000	118500	3150
2317	85	180	41	4,0	175000	143000	3150
2318	90	190	43	4,0	190000	157000	2500
2319	95	200	45	4,0	206000	171500	2500
2320	100	225	47	4,0	238000	197000	2500
2322	110	240	50	4,0	301000	257000	2000
2324	120	260	55	4,0	380000	332000	2000
2326	130	280	58	5,0	424000	374000	2000
2328	140	300	62	5,0	469000	419000	1600
2332	160	340	68	5,0	541000	497000	1600
2336	180	380	75	5,0	764000	724000	1250
2340	200	420	80	6,0	860000	818000	1250
<i>Тяжелая узкая серия</i>							
2605	25	62	24	2,0	36700	27800	8000
2606	30	72	27	2,0	40900	30600	8000
2607	35	80	32	2,5	45800	34200	6300
2608	40	90	33	2,5	59900	46600	6300
2609	45	100	36	2,5	77700	61500	6300
2610	50	110	39	2,5	102000	85500	5000
2611	55	120	43	3,0	113000	92500	5000
2612	60	130	46	3,5	137500	116000	4000
2613	65	140	48	3,5	149000	126500	4000
2615	75	160	55	3,5	208000	183000	3150
2616	80	170	58	3,5	220000	198000	3150
2617	85	180	60	4,0	254000	230000	3150
2618	90	190	64	4,0	265000	240000	2500
2620	100	215	73	4,0	356000	336000	2500
2622	110	240	80	4,0	464000	450000	2000
2624	120	260	86	4,0	548000	532000	2000
2626	130	280	93	5,0	650000	650000	2000
2630	150	320	108	5,0	753000	757000	1600
2634	170	360	120	5,0	1040000	1080000	1250

Таблица П.7

**Подшипники шариковые радиальные однорядные
с двухсторонним уплотнением
(ГОСТ 8882-2021)**



Условное обозначение подшипника	d , мм	D , мм	B , мм	r , мм	C , Н	C_0 , Н	n , об/мин
<i>Легкая широкая серия</i>							
180500	10	30	14	1,0	4590	2670	8000
180501	12	32	14	1,0	4690	2670	8000
180502	15	35	14	1,0	5220	3030	6300
180503	17	40	16	1,0	7360	4410	6300
180504	20	47	18	1,5	8220	5000	5000
180505	25	52	18	1,5	10800	6950	4000
180506	30	62	20	1,5	11600	7740	4000
180508	40	80	23	2,0	23200	17750	3150
180509	45	85	23	2,0	24100	17850	3150
<i>Средняя широкая серия</i>							
180602	15	42	17	1,5	8750	5410	8000
180603	17	47	19	1,5	10700	6680	8000
180604	20	52	21	2,0	12250	7800	10000
180605	25	62	24	2,0	17250	11400	7500
180606	30	77	27	2,0	21600	14800	6000
180607	35	80	31	2,5	25700	17550	5500
180608	40	90	33	2,5	30600	22200	4500
180609	45	100	36	2,5	37100	26200	4500
180610	50	110	40	3,0	47600	35600	4100
180611	55	120	43	3,0	54900	41800	4000
180612	60	130	46	3,5	62900	48500	3400

Учебное издание

Бочкарев Игорь Викторович
Ширинский Сергей Владимирович

РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ
АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ
РАЗЛИЧНЫХ МОДИФИКАЦИЙ

Учебное пособие

Редактор О.А. Бешенцева
Компьютерная верстка А.В. Худяковой

Подписано в печать 15.08.25. Печать офсетная Формат 60x90 1/16
Печ. л. 20,5 Тираж 120 экз. Изд. № 25у-092 Заказ № 216

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.

Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».

111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.

ДЛЯ ЗАМЕТОК